

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS -GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROPAGAÇÃO DO SOM EM LÂMINAS DE ÁGUAS
RASAS POR ACÚSTICA DE RAIOS**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

RICARDO VITOY

Florianópolis, junho de 1999.

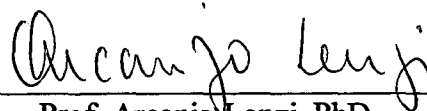
PROPAGAÇÃO DO SOM EM LÂMINAS DE ÁGUAS RASAS POR ACÚSTICA DE
RAIOS

RICARDO VITOY

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
VIBRAÇÕES E RUÍDO, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO.

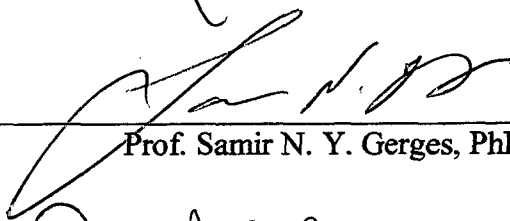


Prof. Arcanjo Lenzi, PhD
Orientador

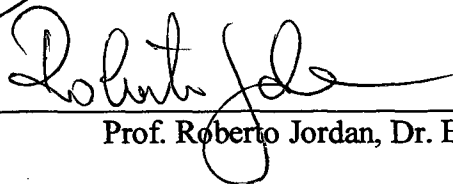


Prof. Abelardo Alves de Queiros, PhD
Coordenador do curso

BANCA EXAMINADORA



Prof. Samir N. Y. Gerges, PhD



Prof. Roberto Jordan, Dr. Eng.



Prof. Eloi Melo Filho, PhD

Para:

ELISABETE, minha esposa, minha
companheira de todos momentos, meu valioso
e único amor.

Meus filhos LUIZ RICARDO, AMANDA
e NAIARA aos quais devo todo o tempo que
dediquei a este trabalho.

OT e TEREZINHA, meus pais, que
souberam me educar para vida e a quem tantas
coisas devo.

AGRADECIMENTOS

- . Universidade Federal de Santa Catarina e ao Laboratório de Vibrações e Acústicas, pelas instalações que proporcionaram o andamento das pesquisas;
- . Marinha do Brasil, Instituto de Pesquisa da Marinha e Capes pelo apoio financeiro;
- . Comandante Casemiro Gabriel, pelo acompanhamento, compreensão e ajuda;
- . Prof. Arcanjo Lenzi, pelos ensinamentos, amizade e expressiva colaboração durante todo o curso;
- . Prof. Wiliam Alves Barbosa, pelos ensinamentos, colaboração, amizade e momentos de descontração;
- . Prof. Roberto Jordan, pelos ensinamentos e compreensão;
- . Prof. Samir N. Y. Gerges, pelos ensinamentos e compreensão;
- . Prof. Domingos, pelos ensinamentos e exemplo de comportamento;
- . Aos amigos e colegas Rodrigo Yoneda, Edmilson Bermudes, André, Joel, Marcos Antonius, Marcos Antônio, Maurici, Jeferson Gomes, Marcelo Stevan, Yoshida, Nilton pela amizade, ajuda e momentos de descontração;
- . Todos aqueles, que por ventura não se mencionou o nome, mas que direto ou indiretamente participaram da elaboração deste trabalho.

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
2. Acústica de raios.....	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. O meio ambiente oceânico.....	8
2.3. Perfil de velocidade do som.....	10
2.4. Equações da teoria de raios.....	13
3. Algoritmo computacional.....	19
3.1. Velocidade sonora.....	21
3.2. Ruído ambiente.....	23
3.3. Fundo oceânico.....	26
3.4. Formulação do traçado de raios.....	26
3.5. Intensidade de onda acústica.....	30
3.5.1. Uso do traçado de raio para cálculo da intensidade acústica.....	31
3.6. Reflexão pelo fundo.....	34
3.6.1. Comportamento do coeficiente de reflexão.....	35
3.6.2. Reflexão na interface água-ar - cálculo 1.....	37
3.6.3. Reflexão na interface água-fundo - cálculo 2.....	38
3.6.4. Reflexão na interface água-fundo - cálculo 3.....	38

4. Validação do modelo implementado.....	40
4.1. Solução analítica.....	40
5. Estudos de casos.....	48
5.1. Quantidade de pontos.....	49
5.1.1. Influência da quantidade de pontos na geração do traçado de raios.....	50
5.1.2. Influência da quantidade de pontos no mapeamento acústico.....	55
5.2. Condições de reflexão.....	57
5.3. Posição da fonte.....	61
5.4. Posição do receptor.....	64
5.5. Solo oceânico.....	66
5.6. Intervalo angular e variação angular.....	69
5.7. Influência do perfil de velocidades.....	71
6. Conclusões.....	74
7. Referências bibliográficas.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação de raios acústicos emergindo de uma fonte pontual com fundo inclinado e superfície plana. Fonte localizada a 100 m de profundidade. As setas mostradas na figura indicam o sentido de propagação da frente de onda.	6
Figura 2.2	Fonte pontual irradiando uniformemente em um meio homogêneo. As setas representam os raios acústicos, e as linhas contínua e tracejada representam as ondas com mesma fase.	7
Figura 2.3	Fonte pontual irradiando uniformemente em todas direções em um meio não homogêneo. As setas representam raios acústicos e as linhas contínuas e tracejadas representam os raios acústicos de mesma fase.	8
Figura 2.4	Perfis de temperatura, salinidade e velocidade sonora em função da profundidade.	12
Figura 2.5	Formas de perfis da velocidade sonora em função da profundidade, que são encontradas no oceano.	14
Figura 2.6	(a) Representação do perfil de velocidade sonora. (b) Traçado da trajetória de um raio em função da posição x, z .	15
Figura 2.7	Representação gráfica do deslocamento do traçado de raios	16
Figura 2.8	Comportamento do traçado de raios em função do perfil de velocidades.	18
Figura 3.1	Fluxograma do programa implementado	20 e 21
Figura 3.2	Perfil de velocidade variável usado no programa de acústica de raios Urick[4].	22

Figura 3.3 Espectro do nível de ruído em baías e portos. Curva AA representa o Porto de Nova York; valor medido durante o dia. Curva BB, a média e várias medições durante a Segunda Guerra. A área hachurada representa medições subsônicas de Knudsen, Alford e Emling[20].	25
Figura 3.4 Representação do traçado de raio passando pelo ponto P_i e tendo o raio de curvatura R com centro no ponto Q , gradiente de velocidade g_r e ângulo w .	27
Figura 3.5 Geometria do traçado de raios.	27
Figura 3.6 Representação geométrica do incremento de distância no traçado do raio.	28
Figura 3.7 Geometria para o cálculo da intensidade acústica.	32
Figura 3.8 Reflexão de onda plana.	34
Figura 3.9 Incidência de onda plana em um meio homogêneo.	35
Figura 3.10 Fluxograma do módulo coeficiente de reflexão.	36
Figura 4.1 Representação das coordenadas cilíndricas utilizadas para resolução do sistema analítico.	41
Figura 4.2 Solução analítica para condição de fundo inclinado $2,86^\circ$, propagação upward, perfil de velocidade constante = 1500 m/s, 1000 pontos de leitura dos dados, fonte a 100m, array a 30m, frequência 25 Hz.	45
Figura 4.3 Solução por acústica de raios e solução analítica para condição de fundo inclinado $2,86^\circ$, propagação upward, perfil de velocidade constante = 1500 m/s, 1000 pontos de leitura dos dados, fonte a 100m, array a 30m, frequência 25 Hz.	46
Figura 4.4 Solução por acústica de raios e solução analítica para condição de fundo inclinado $2,86^\circ$, propagação upward, perfil de velocidade constante = 1500 m/s, 1000 pontos de leitura dos dados, fonte a 100m, array a 30m, frequência 125 Hz.	47
Figura 4.5 Solução por acústica de raios e solução analítica para condição de fundo plano 200m, perfil de velocidade constante = 1500 m/s, 1000 pontos de leitura dos dados, fonte a 100m, array a 100m, frequência 25 Hz.	47

Figura 5.1 Perfil de velocidades utilizado na geração do Traçado de Raios.	50
Figura 5.2 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte a 40m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 1000 pontos gerados e fundo plano com profundidade 200m.	51
Figura 5.3 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte a 40m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 100 pontos gerados e fundo plano com profundidade 200m.	52
Figura 5.4 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte a 40m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 100 pontos gerados e fundo plano com profundidade 100m.	52
Figura 5.5 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte a 40m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 100 pontos gerados e fundo plano com profundidade 50m.	53
Figura 5.6 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte a 15m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 100 pontos gerados e fundo plano com profundidade 30m.	54
Figura 5.7 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte a 40m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 1000 pontos gerados e fundo plano com profundidade 50m.	54
Figura 5.8 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte e receptor a 100m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 10000 pontos gerados e fundo plano com profundidade 200m.	56
Figura 5.9 Variação do nível de pressão sonora com a distância percorrida R, com as condições da Fig. 5.8.	56
Figura 5.10 Traçado de raios com ângulos de ataque 30° e 31° , fonte a 40 m e receptor a 100m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão não especular($R_f = 0,5$), 1000 pontos gerados e fundo plano com profundidade 200m.	57

Figura 5.11 Comportamento do campo acústico da Fig. 5.10, linha tracejada para $R_f = 1$ linha contínua para $n=0,2$ e $m = 1,6$, fonte a 40 m e receptor a 100m, perfil de velocidade da Fig.5.1, 1000 pontos gerados e fundo plano com profundidade 200m.	58
Figura 5.12 Comportamento do campo acústico para $R_f = 1$ (linha tracejada), $n=0,01$ / $m= 1,6$, $n=0,1$ / $m= 1,6$, $n=0,2$ / $m=1,6$ (linhas contínuas respectivamente), fonte a 40 m e receptor a 100m, perfil de velocidade da Fig.5.1, 1000 pontos gerados e fundo plano com profundidade 200m.	58
Figura 5.13 Curvas do módulo do coeficiente de reflexão com $n=0,5$ e m variável.	59
Figura 5.14 Curvas do módulo do coeficiente de reflexão com n variável e $m=1,6$.	60
Figura 5.15 Comportamento do coeficiente de reflexão para $n=1,5$ e $m < 1$.	60
Figura 5.16 Comportamento do coeficiente de reflexão para $n > 1$ e $m=0,5$.	61
Figura 5.17 Comportamento do campo acústico em condições idealizadas de reflexão ($R_f = 1$), fonte a 20m, 40m, 60m, 100m, 175m, 190m; array a 40m, perfil de velocidade variável; fundo inclinado a $2,86^\circ$, sentido de propagação da parte mais funda para mais rasa "upward" e ângulo de ataque $30-31^\circ$.	62
Figura 5.18 Comportamento acústico com $R_f \neq 1$ ($n=0.2$ e $m=1.6$), fonte a 20m, 40m, 60m, 100m, 175m, 190m; array a 40m, perfil de velocidade variável, fundo inclinado a $2,86^\circ$, sentido de propagação da parte mais funda para mais rasa "upward" e ângulo de ataque $30-31^\circ$.	62
Figura 5.19 Comportamento acústico com $R_f \neq 1$ ($n=0.2$ e $m=1.6$), fonte a 20, 40m, 60m, 100m, 175m, 190m; array a 40m, perfil de velocidade constante (1500 m/s), fundo inclinado a 2.86° , sentido de propagação da parte mais funda para mais rasa "upward" e ângulo de ataque $30-31^\circ$.	63

Figura 5.20 Comportamento do campo acústico em condições de reflexão não idealizadas ($n=0,2$ e $m=1,6$), receptor a 20m, 60m, 100m, 150m, 175m, 190m; fonte a 40m, perfil de velocidade variável, fundo inclinado a $2,86^\circ$, sentido de propagação da parte mais funda para mais rasa “upward” e ângulo de ataque $30-31^\circ$.	64
Figura 5.21 Comportamento do campo acústico em condições de reflexão não idealizadas ($n=0,2$ e $m=1,6$), receptor a 20m, 40m, 60m, 100m, 150m, 175m e 190m; fonte a 40m, perfil de velocidade variável, fundo plano a 200m, sentido de propagação da parte mais funda para mais rasa “upward” e ângulo de ataque $30-31^\circ$.	65
Figura 5.22 Comportamento do nível de pressão com fundo inclinado, perfil de velocidade conforme Fig.5.1, $n=0,2$, $m=1,6$, 1000 pontos, fonte e array a 100m, ângulos de ataque 45° e 46° .	66
Figura 5.23 Comportamento do nível de pressão com fundo inclinado, perfil de velocidade conforme Fig.5.1, $n=0,2$, $m=1,6$, 1000 pontos, fonte e array a 20m, ângulos de ataque 45° e 46° .	67
Figura 5.24 Comportamento do nível de pressão com fundo inclinado, perfil de velocidade conforme Fig.5.1, $n=0,2$, $m=1,6$, 1000 pontos, fonte e array a 20m, ângulos de ataque 45° e 46° .	68
Figura 5.25 Comportamento do nível de pressão com fundo conforme Fig.5.23, perfil de velocidade conforme Fig.5.1, $n=0,2$, $m=1,6$, 1000 pontos, fonte e array a 100m, ângulos de ataque 45° e 46° .	68
Figura 5.26 Traçado de raios com ângulos de ataque de 130° e 131° em condições ideais de reflexão ($R=1$), fonte a 100 m, receptor na cota de 30 m de profundidade.	69
Figura 5.27 Campo acústico obtido pelo traçado de raios da Fig.5.26	70
Figura 5.28 (A) Curvas de níveis de pressão com diferentes ângulos de ataque.(B) Traçado de raios, em fundo inclinado, com ângulos de ataque 110° e 111° . Em condições ideais de reflexão ($R=1$), fonte a 100m, receptor na cota de 30 m de profundidade.	70

Figura 5.29 Curvas de níveis de pressão com diferentes ângulos de ataque e faixa angular, em fundo do tipo plano. Em condições ideais de reflexão ($R=1$), fonte a 100 m, receptor na cota de 30 m de profundidade. 71

Figura 5.30 (A) Traçado de raios com distintos perfis de velocidade e posições da fonte. Ângulos de ataque de mesmo valor (90°). (B) Perfis de velocidade dos correspondentes traçados de raios. 72

Figura 5.31 (A) Influência do perfil de velocidades conjugado com a posição da fonte. Ângulo de ataque 90° e fundo plano. (B) Perfil de velocidades utilizado. 72

SIMBOLOGIA

Abaixo estão relacionados os símbolos utilizados ao longo deste trabalho, sendo que os mais específicos encontram-se adequadamente descritos ao longo do trabalho.

γ	=	calor específico
ρ	=	densidade
θ	=	ângulo de incidência
α, β, ω	=	ângulos diretores
θ_B	=	ângulo de Bresser
θ_c	=	ângulo crítico
δS	=	vetor área
a, g, R	=	constantes
AA'	=	área
c	=	velocidade sonora
dr, ds, dl	=	diferenciais
dz		
f	=	frequência
F	=	força
gx, gy, gr	=	gradientes de velocidades
$H()$	=	função de Hankel
$I()$	=	intensidade sonora
$J()$	=	função de Bessel
k	=	número de onda
n, m	=	índices de refração
P	=	pressão
$P_i()$	=	pressão incidente
$P_r()$	=	pressão refletida
Q, Pt	=	indicativos de ponto
r, s, l	=	deslocamentos
rb	=	raio da bolha de gás
rf	=	coeficiente de reflexão
rm	=	raio médio
S	=	salinidade
T	=	temperatura

t	=	tempo
u	=	velocidade de partícula
W	=	trabalho
x, y	=	coordenadas
z	=	profundidade
Z	=	impedância

RESUMO

Os modelos de propagação sonora têm sido usados para simular as condições acústicas no oceano, favorecendo otimizações em sistemas de sonar, predição de sua performance, capacitação de pesquisas e análises em laboratório. Por ser um país de vasta costa oceânica, o Brasil carece de maior controle e exploração, controle de fluxo de embarcações, exploração mineral e exploração pesqueira. Mediante estas necessidades e juntamente com o apoio do Instituto de Pesquisa da Marinha (IPqM), desenvolveu-se este trabalho.

Este trabalho apresenta as etapas de desenvolvimento da formulação do modelo de acústica de raios com as características e propriedades próprias de regiões de águas rasas. São também apresentadas as considerações, as simplificações e a validação do programa computacional, desenvolvido em linguagem C, através das considerações acima mencionadas e cuja utilidade prática é dirigida para a Marinha do Brasil.

Foram analisados casos cujas variáveis foram o tipo de fundo (plano, inclinado e geometrias definidas), perfis variados de velocidade, condições de reflexões, posição da fonte, posição do receptor, número de pontos, feixe angular e variação angular. Destes estudos pode-se comprovar o comportamento sonoro no meio submarino, observar algumas tendências, conhecer as limitações do método de acústicas de raios e do programa computacional que fora implementado.

ABSTRACT

Sound propagation models have been used to simulate oceans acoustics characteristics, yielding to SONAR systems optimizations, predictions of their performances and use in laboratory research and analyses. Due to its extense coast, Brazil needs to increase underwater mining and fishing activities.

This work represents the first steps towards the development of a code for sound transmission loss analysis in shallow water based on Ray Acoustics. All computer routines were written in C language. Simplifying assumption, comparisons with analytical results and other considerations made use also presented.

Cases analysed in this work include variation of the Sea floor geometry, sound speed profiles, sound and receptor positions, number of points defining the grid and the regular variations of the rays. Comparisons with analytical results shower good agreement. The limitations and the potential of this transmission loss determinations procedure are discussed.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As pesquisas e os estudos do comportamento do som na água tiveram início a partir da seguinte afirmação, que é atribuída a Leonardo da Vinci: “Se você parar seu barco, colocar a ponta de um longo tubo na água e na outra extremidade seu ouvido, será capaz de ouvir barcos a grandes distâncias de você.” [23].

Este marco inclui os elementos básicos para um moderno sistema de sonar passivo, sendo, por isso, considerado um grande precursor da Acústica Submarina.

Durante a Primeira Guerra Mundial, os ataques constantes dos submarinos, aos navios inimigos ingleses causaram a intensificação dos esforços para o desenvolvimento de equipamentos para a detecção de submarinos. Desenvolveram-se, então, os detetores passivos, cujos princípios eram diretamente descendentes do tubo de escuta de Leonardo da Vinci.

Naquela época, o maior desenvolvimento ocorreu nas áreas de componentes elétricos e eletrônicos, necessários para a geração de sinais submarinos e para a conversão de sinais acústicos em sinais elétricos.

Os estudos do modelo físico envolvendo propagação sonora no oceano começaram a surgir a partir de 1930 [16]. A absorção do som pela água foi medida em frequências ultra-sônicas, iniciando um novo campo de pesquisa que trata do fenômeno da absorção sonora em função das frequências de interesse. Já em 1937[3] foi inventado o bathtermógrafo, por Athelstan Spilhaus, o que permitiu medições rápidas e eficientes da temperatura da água, com a profundidade, o que é comumente chamado de perfil de velocidade.

Durante a Segunda Guerra Mundial, quando a aplicação prática era intensificada e o tempo de pesquisa era extremamente reduzido, certas questões científicas não foram respondidas. Grande atenção foi dada para sistemas de sonar ativo, que emite um sinal e capta a presença de obstáculos através dos sinais refletidos. O progresso nesta área de estudos estava

diretamente relacionado ao conhecimento da propagação sonora submarina. Com o término da Segunda Guerra Mundial foi publicada uma série de artigos técnicos intitulada “Física do Som no Oceano” [12]. Estas publicações formularam as bases teóricas para os modelos de propagação sonora no oceano, reverberação, e a reflexão do som em anteparos.

Com o fim da Segunda Guerra Mundial o número de experimentos práticos foi reduzido e aumentaram as pesquisas de simulação. A partir dos anos sessenta os estudos foram direcionados ao desenvolvimento de novos modelos analíticos e numéricos para que fossem analisados e comparados com os dados coletados experimentalmente.

Estes modelos têm sido usados para planejar as condições acústicas no oceano, favorecendo otimizações em sistemas de sonar, predição de sua performance, capacitação de pesquisas e análises em laboratório. Auxiliam também na pesquisa e ao desenvolvimento da aquicultura, acompanhamento no desenvolvimento de espécies e toda fauna marinha.

A transmissão da onda sonora na água é muito eficiente em relação às ópticas, de rádio ou magnéticas, sendo por isso amplamente usada para comunicações em meios submarinos. Por ser um país de vasta costa oceânica, o Brasil carece de maior controle e exploração, controle de fluxo de embarcações, exploração mineral e exploração pesqueira.

Um modelo computacional eficiente representa uma poderosa ferramenta para centros de pesquisas que não dispõem de onerosos equipamentos de pesquisa prática, além de permitir a análise dos vários parâmetros que influenciam na propagação submarina.

O modelo de acústica de raios, com variação em 1 direção, se baseia na Lei de Snell[2]. Suas principais variáveis são o perfil de velocidade que é função principalmente da profundidade, da temperatura e da salinidade; distância da fonte e tipo de fundo. Estas variáveis interferem nos aspectos físicos envolvidos, reflexões, absorção, sombreamento e cáusticas.

Clay[2] e Etter [19] apresentam as características do meio oceânico, os tipos de animais marinhos, as formações geofísicas do leito, formação das ondas e correntes marítimas. Urick[4] apresenta um enfoque acentuadamente prático caracterizando os sistemas de sonar, os transdutores e os princípios

acústicos. Soares[6], Clay[2] e Mackenzie[7] apresentam resultados experimentais da velocidade do som. Brekhovskikh [18] aborda a teoria de raios partindo da Equação de Helmholtz e formula a teoria básica da intensidade sonora em função do ângulo de ataque, que se entende como o ângulo formado pelo raio acústico passando pela fonte pontual e a vertical que passa por este mesmo ponto, da directividade da fonte, do ângulo de azimuth do raio e da distância percorrida. Frisk [17] e Brekhovskikh [18] apresentam formulações sobre a reflexão de ondas planas. Kibblewhite [1] descreve as formas de atenuação do som nos sedimentos marinhos considerando diversos fatores tais como porosidade, densidade, impedância, módulo de elasticidade, grau de saturação do sedimento e frequência.

Este trabalho apresenta as etapas de desenvolvimento da formulação do modelo de acústica de raios com as características e propriedades próprias de regiões de águas rasas. São também apresentadas as considerações, as simplificações e a validação do programa computacional desenvolvido através das considerações acima mencionadas e cuja utilidade prática é dirigida para a Marinha do Brasil.

Para a sua implementação tornaram-se necessários conhecimentos de linguagem de programação C++, para que este modelo fosse implementado de forma mais eficaz.

O Capítulo 2 descreve os princípios da acústica de raios e suas características específicas, o comportamento dos raios acústicos em função do perfil de velocidades, dos seres marinhos, da presença de bolhas, do teor de salinidade e densidade. Desenvolvem-se também neste capítulo as equações da teoria de raios e suas simplificações.

O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento para implementação de acústica de raios e as influências das condições de contorno. Aborda o ruído ambiente a fim de utilizá-lo como um parâmetro otimizador da lógica computacional e apresenta as equações e princípios básicos sobre intensidade e reflexão.

O Capítulo 4 trata de métodos para validação do programa de acústica de raios, utilizando-se de comparações com soluções analíticas de fundo

inclinado, fundo plano e modelos da literatura. Apresenta o fluxograma e comentários do programa implementado.

No Capítulo 5 são apresentados os casos estudados, os quais envolvem a geometria e as condições do fundo, densidade, velocidade do som nos meios, perfis de velocidade, posição da fonte e receptor. A comparação é feita mediante gráficos e utilização de um programa auxiliar para cálculo de desvio padrão e variância.

O sexto e último capítulo apresenta as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ACÚSTICA DE RAIOS

2.1 - INTRODUÇÃO

Acústica de raios é o nome atribuído ao modelo matemático que representa acusticamente as ondas planas que se propagam em um meio, de velocidade sonora variável ou constante. Ao contrário da velocidade do som na atmosfera, que sofre pouca variação com a altitude, no meio oceânico a velocidade sofre uma variação em função da pressão e da temperatura, até uma profundidade de 1000 m, aproximadamente. Abaixo disto, o oceano é considerado aproximadamente isotérmico e a variação da velocidade é causada quase que exclusivamente pelo aumento da pressão.

Os raios acústicos representam a trajetória que a frente de onda percorre. O nome “raio” vem da óptica, pois sabe-se que as propriedades da luz atravessando um meio não homogêneo podem ser analisados em termos de raios ou trajetórias de luz, desde que as variações no meio ocorram em uma escala maior em comparação com o comprimento de onda. Mais precisamente raio é a curva tangente ao vetor velocidade de grupo e para ondas sonoras, raio é a curva tangente ao vetor \mathbf{R} (n° de onda). São linhas perpendiculares a esta frente de onda definindo o fluxo de energia da propagação sonora, conforme pode-se observar através da Fig. 2.1.

A composição de raios pode ser usada na indicação da intensidade acústica. Para ondas planas estes raios são igualmente espaçados, sendo o espaçamento inversamente proporcional à intensidade. Se a variação da intensidade for gradual com a distância, os raios não são mais paralelos, mas sim inclinados, conforme a variação da intensidade.

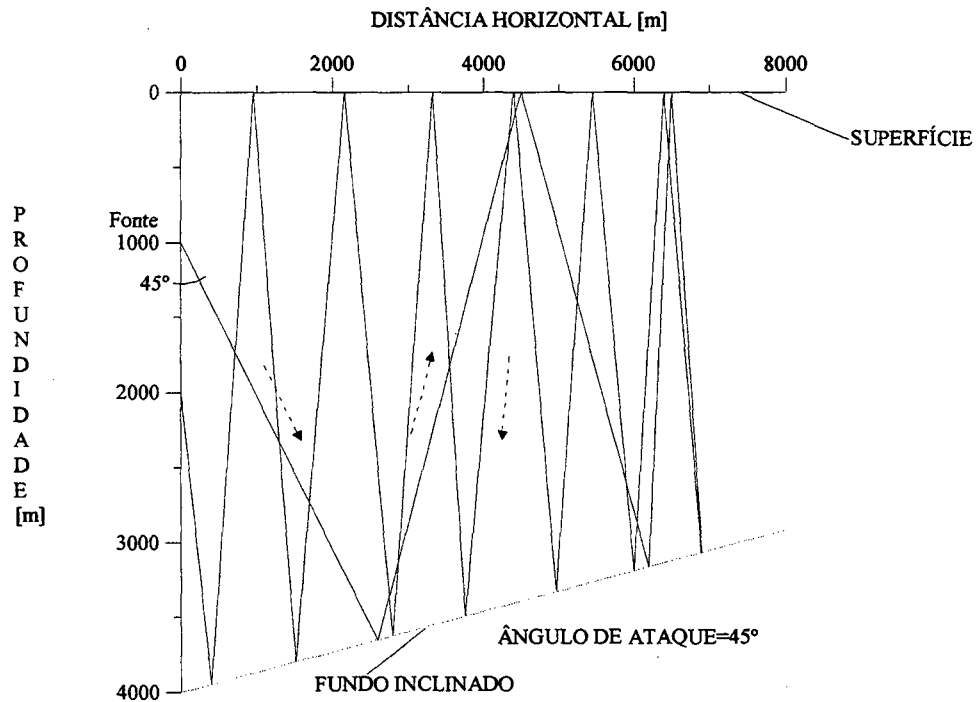


Figura 2.1 Representação de raios acústicos emergindo de uma fonte pontual com fundo inclinado e superfície plana. Fonte localizada a 1000 m de profundidade. As setas mostradas na figura indicam o sentido de propagação da frente de onda.

Considera-se como primeiro exemplo a propagação gerada por uma fonte pontual, irradiando energia acústica igualmente em todas direções (Fig. 2.2) em um meio homogêneo infinito, no qual podem-se desconsiderar as influências dos contornos e as variações dos mesmos. Neste meio, a taxa de energia propagada é igual em todas as direções. Sua representação tem a forma de uma superfície esférica. Os raios são desenhados perpendicularmente à frente das ondas e formam a separação angular de mesmo valor partindo-se da fonte.

A potência acústica é proporcional ao número de raios que emergem da fonte. Ao se propagar ocorre um aumento da área da superfície esférica proporcional ao quadrado da distância. O número de raios por unidade de área reduz com mesma proporção, o mesmo acontecendo com a intensidade acústica. Tal procedimento permite uma metodologia de cálculo que merece algumas observações, ou controle, quando se refere ao programa que se pretende implementar. Quando a área entre os raios atinge seu valor mínimo,

na intersecção de raios, a fórmula de cálculo representa um valor infinito formando pontos e regiões conhecidas como cóusticas.

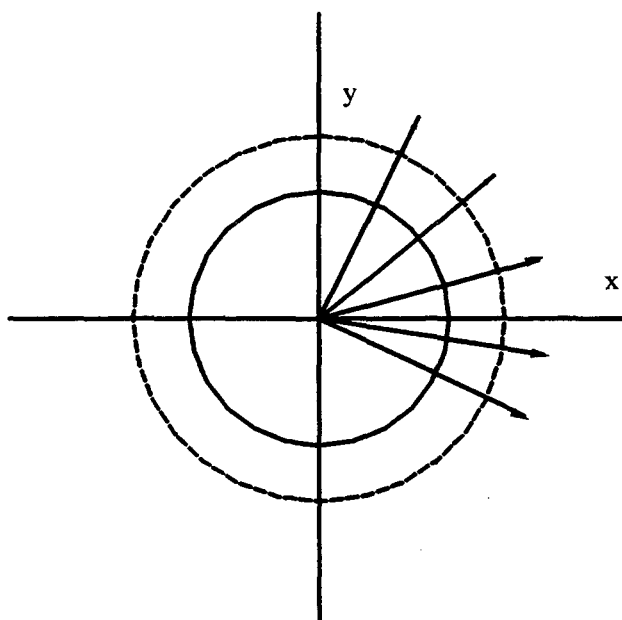


Figura 2.2 Fonte pontual irradiando uniformemente em um meio homogêneo. As setas representam os raios acústicos, e as linhas contínua e tracejada representam as ondas com mesma fase.

A Fig. 2.3 mostra sua fonte pontual irradiando uniformemente em todas as direções, mas em um meio não homogêneo, inicialmente os raios propagam-se com mesma direção, à medida que se distanciam da fonte, a frente de onda de mesma fase se propaga em forma de uma superfície não esférica. Os raios partem inicialmente com direção perpendicular à frente de onda e, posteriormente, apresentam trajetórias curvas com diferentes raios de curvatura. A trajetória dos raios e a representação do mapeamento do campo acústico podem ser obtidas por algoritmos computacionais baseados na acústica de raios, que fornecem o comportamento sonoro nestes meios de acordo com a representação da velocidade sonora e condições de contornos do meio.

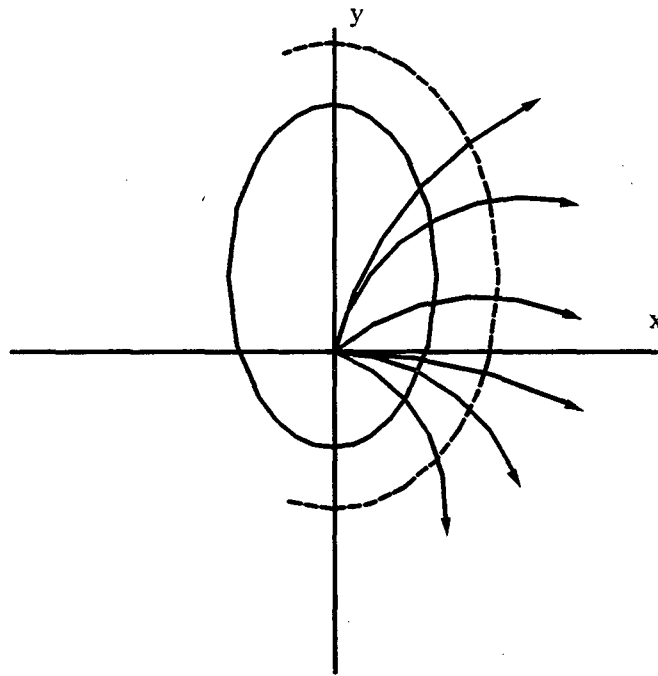


Figura 2.3 Fonte pontual irradiando uniformemente em todas direções em um meio não homogêneo. As setas representam raios acústicos e as linhas contínuas e tracejadas representam os raios acústicos de mesma fase.

2.2 - O MEIO AMBIENTE OCEÂNICO

O oceano contém uma infinidade de seres vivos e estes representam parâmetros importantes na propagação sonora. São compostos, em sua maioria, por seres marinhos com dimensões que variam de $2\mu\text{m}$ até comprimentos maiores que 20 m, que são as baleias [2]. Do ponto de vista acústico estes seres representam peças do oceano em que a densidade e a compressibilidade diferem das propriedades do líquido ambiente. Esta diferença provoca a reflexão das ondas sonoras, que através do sonar, podem ser identificadas dependendo da diferença de compressibilidade, da densidade e do tamanho do corpo, comparado com o comprimento de onda do som. Caso o comprimento de onda utilizado seja maior que as dimensões do ser vivo a ser identificado, torna-se difícil a sua detecção pelo fato de a intensidade sonora refletida ser pequena.

Outra presença importantíssima para efeitos acústicos é a formação de bolhas de ar no oceano. Estas bolhas são oriundas de dois casos: bolhas livres e bolhas utilizadas por seres marinhos para se locomoverem. As bolhas de ar possuem uma frequência característica de ressonância, expressa pela Equação 2.1 (Clay e Medwin[2]).

$$f = \frac{1}{2\pi r_b} \left(\frac{3\gamma P}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

na qual

r_b = raio da bolha de gás (m)

γ = calor específico (1,4 para o ar)

P = pressão ambiente (Pa)

ρ = densidade da água ($\approx 1035 \text{ kg/m}^3$)

Desta forma os peixes que carregam gás (ar) nos seus pulmões, através da detecção de sinais com frequência na região das de ressonância, torna-se fácil detectá-los.

Outro fator importante é o tipo de fundo oceânico. A formação deste relevo provém inicialmente do magma que vem do interior da terra, emerge na superfície do solo, solidifica e cria um novo solo. Com o passar do tempo vão-se depositando finas partículas originárias de erosões, plantas marinhas e carcaças de animais ou compostos de sílica (SiO_2) e de carboneto de cálcio (CaCO_3), formando uma camada de sedimento cobrindo as extensões mais baixas do fundo oceânico [2]. Estes componentes formam estruturas com diferentes composições físico-químicas, influenciado significativamente nas características acústicas destes contornos. O sedimento apresenta uma estrutura mais porosa, favorecendo a absorção e o espalhamento da onda incidente, enquanto que no solo formado pelo magma há pouquíssima absorção e a onda incidente é praticamente toda refletida.

A superfície água/ar do oceano pode ser interpretada [2] como sendo o resultado da composição de várias ondas de diferentes comprimentos de onda,

que se propagam na superfície em diferentes direções, oriundas, em pequenas proporções, da movimentação eólica e, em grande proporção, dos movimentos sísmicos e fluxos de correntes marítimas.

2.3 - PERFIL DE VELOCIDADE DO SOM

Kuwahara[8] publicou em 1938 uma equação, em função da salinidade, e tabelas que permitem calcular a velocidade sonora como função da temperatura, da profundidade, da latitude, utilizando-se de ábacos. Em 1951 publicou uma nova equação aprimorada e em 1960 Mackenzie[9] implementou esta equação para resolução em computadores reduzindo desta forma, drasticamente os cálculos dos dados oceanográficos. Desde 1964, vem-se adaptando esta e outras equações através de ajustes, que são aplicados após comparações com dados práticos. Vários estudos vem sendo realizados no sentido de apresentar uma solução mais adequada, como o trabalho de Mackenzie[7], que compara formas de cálculo da velocidade sonora.

A velocidade sonora no oceano é uma variável que determina várias peculiaridades da transmissão sonora no ambiente. Esta varia com a profundidade, com o clima, com a localização geográfica e com o tempo.

Porém, para fins de cálculo de valores instantâneos, assume-se que o clima seja constante, que a posição geográfica também seja constante e que o tempo de processamento seja pequeno, ou seja, que não haja variações dos dados no período de tempo em que se realizam as medições para o desenvolvimento dos cálculos da velocidade. Portanto, há muitos anos vêm-se realizando experimentos para o cálculo da velocidade sonora em função da densidade, usando valores da temperatura da água, salinidade e pressão. A expressão desenvolvida por Mackenzie[7] é

$$c = 1448,96 + 4,591 T - 5,304 \cdot 10^{-2} T^2 + 2,374 \cdot 10^{-4} T^3 + 1,340(S-35) + 1,630 \cdot 10^{-2} z + 1,675 \cdot 10^{-7} z^2 - 1,025 \cdot 10^{-2} T(S-35) - 7,139 \cdot 10^{-13} T z^3 \quad (2.2)$$

onde c é a velocidade sonora no oceano (em m/s), T é a temperatura da água (em graus Celsius), S é a salinidade (em partes por mil) e z é a profundidade (em m). Esta equação é válida nas seguintes faixas:

$$0^{\circ}\text{C} < T < 30^{\circ}\text{C}$$

$$30 \text{ ppt} < S < 40 \text{ ppt}$$

$$0 < z < 8000 \text{ m}$$

As formas práticas de se obter a velocidade sonora no oceano baseiam-se em medir a velocidade sonora como uma função da profundidade no oceano, através do bathtermógrafo, ou através do medidor de velocidade, que mede diretamente a velocidade do som em termos do tempo de propagação em uma distância fixa constante. O bathtermógrafo, mede a temperatura como função da profundidade, e através destes dados e utilizando a formulação da velocidade sonora expressa na Eq. 2.2, obtém-se a velocidade. Já o medidor de velocidade mede diretamente a velocidade sonora em termos do tempo gasto para percorrer uma trajetória fixa constante. Dentre os dois, tem sido mais utilizado o bathtermógrafo devido à sua simplicidade conjugada com a satisfatória precisão e baixo custo de aquisição.

Os valores de temperatura, salinidade e densidade, bem como a presença de bolhas e de objetos, estão em constantes variações, o que indica que estes fatores acústicos nunca são constantes no espaço e no tempo. Próximo à superfície de interface água-ar, estas variações ocorrem em tempos da ordem de segundos devido à grande turbulência do local. Para maiores profundidades, esta escala de tempo, da variação, passa a ser horária, diária e até sazonal, pelo fato de tornar-se um meio menos heterogêneo.

Os comportamentos típicos podem ser observados através da Figura 2.4, Clay [2].

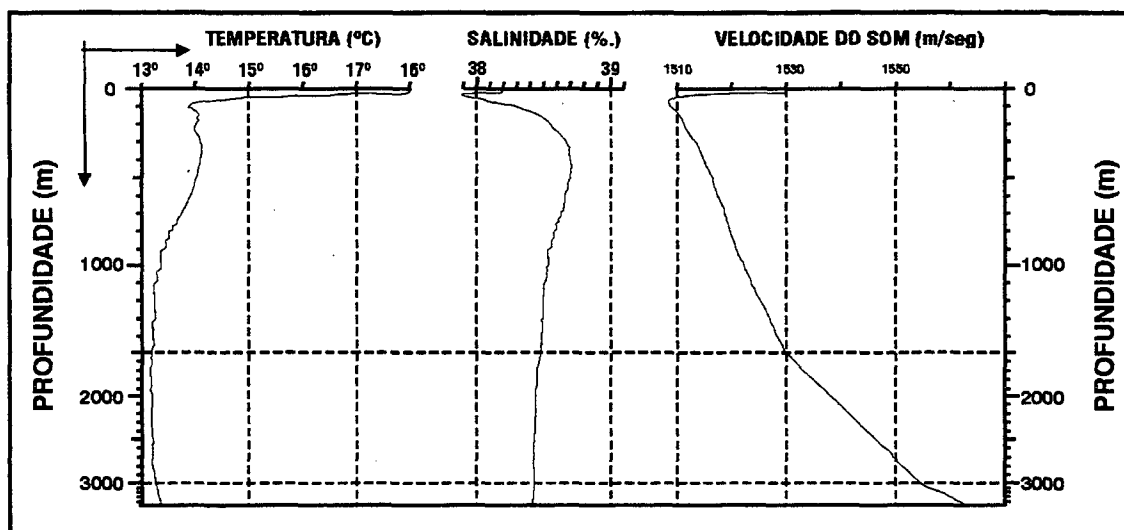


Figura 2.4 Perfis de temperatura, salinidade e velocidade sonora em função da profundidade.

Embora a variação da amplitude da velocidade sonora no oceano seja relativamente pequena, em algumas regiões chega em torno de 1480 m/s a 1560 m/s, este causa um efeito significativo na propagação sonora oceânica a grandes distâncias (milhares de metros). Dependendo do perfil de velocidade, o som pode propagar-se a centenas de quilômetros, enquanto que com outro tipo de perfil, a distância que o som percorre pode ser de apenas algumas dezenas ou unidades de quilômetros, devido as variações na direção de propagação do som.

O perfil que foi adotado e que será descrito mais detalhadamente no Capítulo 3, apresenta velocidade mínima para uma profundidade de 200 m. Para profundidades até 100m , a velocidade aumenta devido ao aumento de temperatura e também abaixo deste, devido ao aumento de pressão hidrostática. Este perfil favorece à propagação de uma fonte localizada no ponto de velocidade mínima e com pequeno ângulo de ataque. Propagando-se com estas condições não favorece à incidência da onda sonora com o fundo e com a superfície, não havendo, portanto, transmissão, difração e refração com estes contornos. Podendo, assim, se propagar a longas distâncias do ponto de origem.

2.4 - EQUAÇÕES DA TEORIA DE RAIOS

A propagação de uma onda plana em um meio homogêneo caracteriza-se pela constância de sua intensidade e direção e pelo aumento linear da fase com a distância. Baseado na equação da onda e em algumas simplificações, pode-se desenvolver uma ferramenta muito utilizada nas análises de propagação acústica, que é o traçado de raios. Utiliza-se a Lei de Snell (Eq. 2.3) para traçar a trajetória da frente de onda em um meio não homogêneo, cujos valores da velocidade do som variam com a profundidade da lâmina de água.

Ao traçar o diagrama de raios são identificados os caminhos percorridos pelas frentes de onda, identificando o trajeto da propagação sonora e as regiões de concentração de energia no meio em questão. Em seguida são calculadas as intensidades parciais dos conjuntos de raios para posteriormente poder definir o campo sonoro, que pode ser definido através de operações aritméticas das intensidades parciais previamente calculadas.

No programa de traçados de raios utiliza-se um gradiente de velocidade sonora variável em função da profundidade. Para tal, considera-se o meio estratificado horizontalmente. Esta simplificação representa com suficiente precisão as regiões de oceano aberto, cuja velocidade sonora possui valores que variam pouco em centenas de quilômetros. O mesmo não ocorre nas regiões próximas de embocaduras de rios, barras e lagoas. Também não se aplica às regiões onde há correntes e mudanças laterais frequentes.

Baseado na Lei de Snell, pode-se escrever:

$$\frac{\sin(\theta_1)}{c_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{c_2} = \frac{\sin(\theta_3)}{c_3} = \dots = \frac{\sin(\theta_i)}{c_i} \quad (2.3)$$

onde

θ_i = ângulo de incidência no meio i

c_i = velocidade sonora no meio i

Considerando o meio constituído de i lâminas de espessuras infinitesimais, a velocidade do som torna-se uma função contínua da

profundidade, $c(z)$, aproximando-se, desta forma, para uma condição real. Estas divisões, (ou o número de trechos i) podem ser determinadas previamente de acordo com o perfil de velocidade em questão, como pode ser observado abaixo, através dos vários perfis mostrados, sendo um perfil de velocidade uniformemente variável em cada lâmina. O comportamento de uma curva linearmente variável necessita de apenas uma divisão (Fig. 2.4), enquanto que curvas com várias inclinações diferentes necessitam de um número maior de divisões, para representar de forma simplificada o perfil de velocidade do som em toda a espessura da lâmina de água.

O desenvolvimento de um modelo conforme configuração acima, constituído de i lâminas com gradientes constantes de velocidade do som, proporciona uma variação contínua, em cada lâmina considerada, do ângulo do raio, obedecendo à relação da Lei de Snell. Para a determinação da trajetória do raio e do tempo consumido, requer-se uma integração da Eq. 2.4, envolvendo a Lei de Snell para o caso particular $c(z)$ em um meio. A integral depende basicamente da profundidade por ser a velocidade sonora função também da profundidade, z .

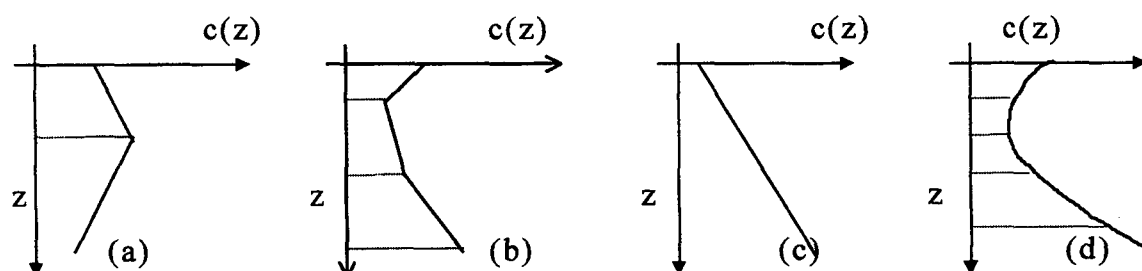


Figura 2.5 Formas de perfis da velocidade sonora em função da profundidade, que são encontradas no oceano.

- (a) Estratificação através de duas funções lineares, forma convexa e ponto de maior velocidade situado entre a superfície e o fundo.
- (b) Estratificação com três funções lineares, forma côncava e ponto de menor velocidade situado entre a superfície e o fundo.
- (c) Estratificação com uma função linear crescente.

- (d) Estratificação através de 04 funções uniformemente variáveis, forma côncava e ponto de menor velocidade situado entre superfície e fundo.

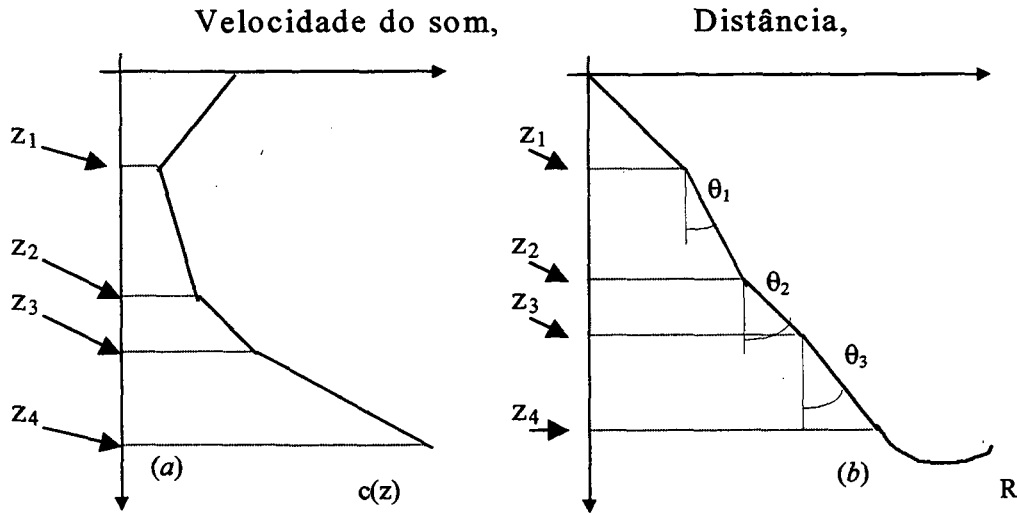


Figura 2.6 (a) Representação do perfil de velocidade sonora.
(b) Traçado da trajetória de um raio em função da posição x, z .

Seja s o deslocamento de posição do raio acústico e tendo como origem a fonte pontual e t o tempo gasto para percorrer este deslocamento. Equacionando o diferencial da distância ds , e do tempo dt , em função do diferencial da profundidade dz e o ângulo θ formado por ds e dz (Fig. 2.7), tem-se

$$ds = \frac{dz}{\cos \theta}$$

$$dt = \frac{ds}{c(z)} = \frac{dz}{c(z) \cos \theta} \quad (2.4)$$

A distância horizontal r é dada por

$$dr = \tan \theta dz \quad (2.5)$$

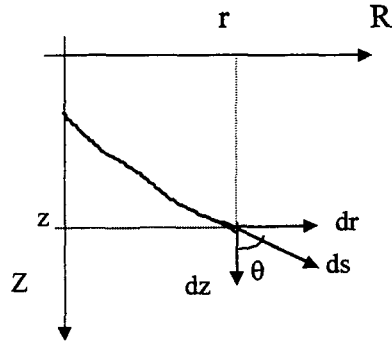


Figura 2.7 Representação gráfica do deslocamento do traçado de raios

Utilizando-se a Lei de Snell para substituir $\sin \theta$, $\cos \theta$ e $\tan \theta$, e fazendo $a = \sin \theta / c(z)$, sendo a constante em cada lâmina, pode-se escrever

$$\cos \theta = [1 - a^2 c^2(z)]^{1/2}$$

$$\tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = ac(z)[1 - a^2 c^2(z)]^{-1/2} \quad (2.6)$$

Integrando ao longo das condições iniciais z_i e finais z_f obtem-se

$$t_f - t_i = \int_{z_i}^{z_f} \frac{dz}{c(z) \cos \theta} = \int_{z_i}^{z_f} \frac{dz}{c(z)[1 - a^2 c^2(z)]^{1/2}} \quad (2.7a)$$

$$r_f - r_i = \int_{z_i}^{z_f} \tan \theta dz = \int_{z_i}^{z_f} \frac{ac(z)dz}{z[1 - a^2 c^2(z)]^{1/2}} \quad (2.7b)$$

Conhecendo-se r_i e t_i , e dividindo-se o oceano em pequenas lâminas onde $c(z)$ comporta-se como uma equação de ordem n , tem-se

$$c_i(z) = K_i + J_i z^n \quad (2.8)$$

Sendo n de ordem 1, ou seja $n = 1$

$$c_i(z) = K_i + J_i z \quad (2.9)$$

Substituindo na Eq. 2.7b obtém-se

$$r_f = r_i + \int_{z_f}^{z_f} \frac{a(K_i + J_i z)}{[1 - a^2(K_i^2 + 2K_i J_i z + J_i^2 z^2)]^{1/2}} dz \quad (2.10)$$

Dependendo do perfil de velocidades, conforme pode-se observar através da Fig.2.8, a direção de propagação do raio torna-se horizontal se:

$$\text{sen } \theta_i = \frac{c(z_i)}{c(z)} \quad (2.11)$$

Em regiões com perfil de velocidade constante, Fig.2.8.b, não há variação angular, fazendo com que a inclinação da trajetória dos raios mantenha os ângulos iniciais. Já na região onde se localiza a velocidade, Fig.2.8.c, mínima do perfil de velocidade, o raio acústico tende a alcançar a maior distância horizontal. Esta comparação pode ser melhor acompanhada pelas Fig. 2.8.a, Fig.2.8.b, Fig.2.8.c, Fig.2.8.d .

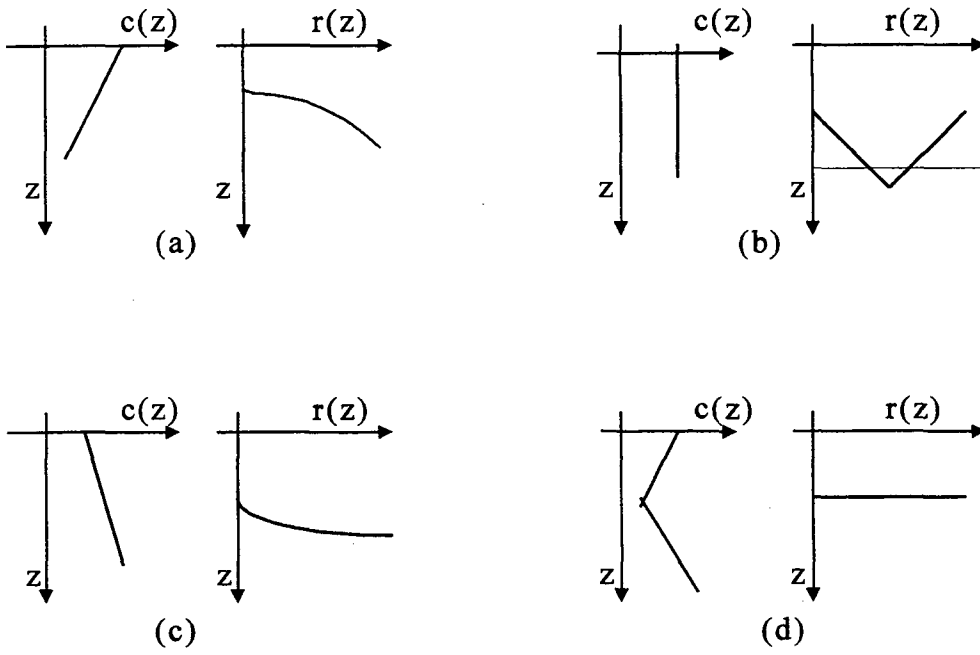


Figura 2.8 Comportamento do traçado de raios em função do perfil de velocidades.

CAPÍTULO 3

ALGORITMO COMPUTACIONAL

O desenvolvimento da teoria da acústica de raios tem acompanhado diferentes trajetórias históricas como a teoria ótica e a teoria eletromagnética. Sabendo-se tratar de um princípio único, a propagação sonora na água é análoga à propagação do som no ar, produzido por um instrumento musical.

Na acústica, o traçado de raios pode ser interpretada como uma aproximação matemática da teoria da onda e, em se tratando de acústica submarina, em que o meio é heterogêneo e cercado de interfaces complexas, a teoria de raios tem historicamente provado ser uma ferramenta indispensável para a compreensão e o estudo da propagação sonora. Com o advento de melhores sistemas computacionais, cuja velocidade de processamento torna-se cada vez maior, a propagação sonora no oceano pode ser estudada qualitativa e quantitativamente em maiores detalhes sem que seja necessário dispor de expressivo tempo para processamento e apresentação dos dados de interesse.

Na elaboração do programa utilizado para estudos de casos, ora denominado de PAS, procurou-se respeitar as condições mais relevantes e balancear a precisão dos dados com o tempo de processamento. O reduzido tempo de processamento constitui também numa das principais características do método de traçado de raios e, com base nestes requisitos, procurou-se elaborar um algoritmo computacional que atendesse às necessidades da melhor forma possível.

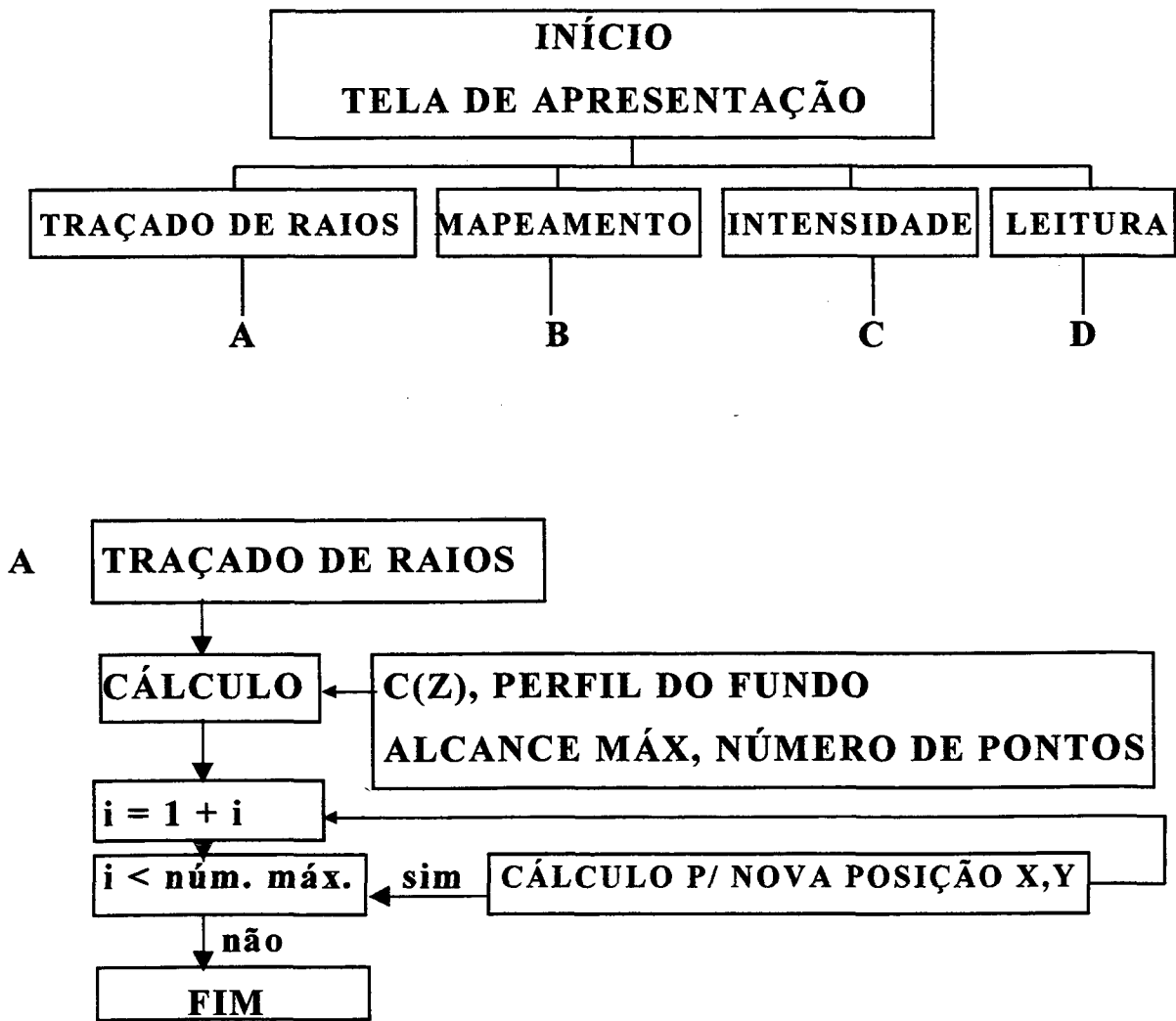
O PAS foi elaborado em linguagem C++ e com estrutura modular para proporcionar uma maior versatilidade no estudo das variáveis envolvidas. Com esta arquitetura de programação o PAS fica segmentado em quantas partes forem necessárias, proporcionando assim facilidades para estudos individuais e combinados das variáveis e funções envolvidas no processo.

O desenvolvimento da função velocidade se fez através da implementação do método dos mínimos quadrados que, a partir de um

conjunto de pontos e a incerteza a se atingir, apresentava a curva ideal com suas respectivas ordens e coeficientes. Desta forma podem-se obter valores contínuos e precisos ao longo de regiões, cujo conjunto de pontos medidos ou propostos possibilitavam uma margem de erro considerável.

A interface gráfica, que tem por objetivo apresentar os resultados gerados pelo programa, não foi desenvolvida por fugir do escopo deste trabalho. Para execução deste, foram utilizados softwares de apoio, como GRAPHER, MATHCAD e EXCEL.

FLUXOGRAMA IMPLEMENTADO



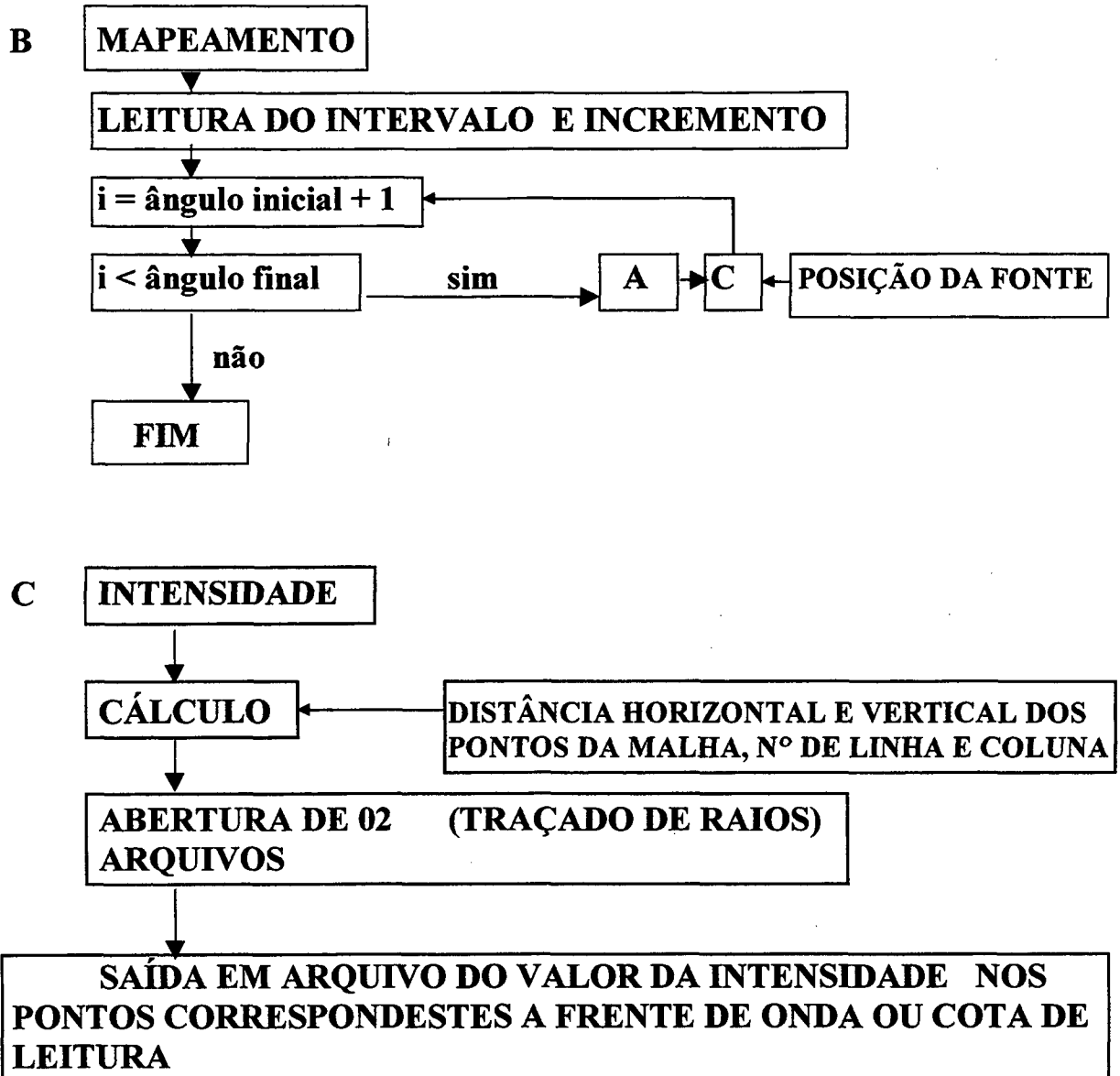


Figura 3.1 Fluxograma do programa implementado.

3.1- VELOCIDADE SONORA

No traçado de raios um dos principais parâmetros, se não o principal, é o perfil de velocidades. Todos os cálculos adiante dependem de valores suficientemente precisos da velocidade sonora para que não agregue erros nas futuras operações aritméticas, prejudicando, ou até invalidando, os resultados do modelo de propagação.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi adotado um perfil típico (Fig. 3.2), que fosse comumente utilizado nos modelos de pesquisa e que

fosse também representativo em relação aos dados obtidos do oceano, tendo desta forma uma referência para comparações de dados e de resultados. Utilizou-se, então, o perfil de velocidade padrão apresentado por Urick[4]. Tal perfil pode ser dividido em quatro regiões, cujas características diferem uma das outras.

A primeira, até 20m de profundidade (logo abaixo da superfície, interface água/ar), a velocidade sonora é vulnerável às mudanças que ocorrem ao longo do dia e às alterações climáticas como aquecimento, resfriamento e ação do vento.

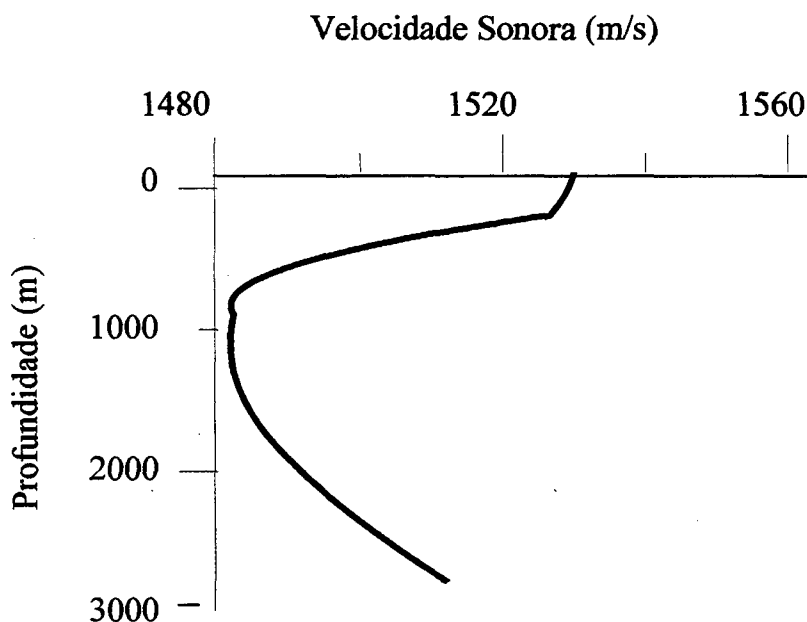


Figura 3.2 Perfil de velocidade variável usado no programa de acústica de raios Urick[4].

Na segunda, que se estende de 20m a 200m de profundidade, encontra-se a chamada Termoclina, que possui um decaimento relativamente rápido da temperatura e, logo, da velocidade com a profundidade.

A terceira, de 200m a 1000m, é caracterizada significativamente pela variação sazonal e redução gradativa do gradiente negativo da temperatura. Nesta região encontra-se o ponto de menor velocidade. Na quarta região, para profundidades superiores a 1000m, a temperatura é aproximadamente

constante, e próxima de 4 °C. A velocidade do som aumenta com a profundidade devido ao efeito do aumento de pressão.

3.2- RUÍDO AMBIENTE

O ambiente oceânico com sua diversidade de seres e fenômenos físicos faz com que este meio se torne provido de várias fontes sonoras com intensidades e espectros diferentes, contribuindo para a formação do ruído de fundo que, segundo Urick [4], a faixa de frequência em que se faz a interferência é de 1 Hz a 100kHz. Nesta faixa os dados mostram que o ruído ambiente possui características diferentes em função da frequência, das curvas espectrais e das condições climáticas, como por exemplo a velocidade do vento.

Os diversos fatores que contribuem para a formação deste ambiente ruidoso, estão listados abaixo[19].

- **Marés e efeitos hidrostáticos das ondas.** As marés e as ondas causam alterações de relativamente grandes amplitudes na pressão hidrostática em baixas frequências do espectro. Como exemplificação pode-se considerar a variação provocado pelas marés, que considerando um ciclo de duas vezes ao dia, pode provocar alterações, da pressão hidrostática, na ordem de 30×10^{-3} Pa.
- **Distúrbios sísmicos.** Devido à terra estar em estado constante de atividade sísmica, é um importante causador de ruídos em baixas frequências no oceano.
- **Turbulência.** A turbulência, normalmente interpretada como perturbações aleatórias do escoamento, é capaz de criar diversas fontes de ruído, seja pela interferência produzida no próprio hidrofone, ou seja pelas alterações de pressão causadas pela turbulência que pode ser radiada às grandes distâncias e, principalmente, pelos efeitos acústicos da turbulência.

- **Interações não lineares entre ondas.** Este efeito pode ser formado quando da incidência de ondas de superfície se propagando em sentidos opostos e se encontrando uma com a outra, formando-se uma fonte ruidosa geradora em baixas frequências.
- **Tráfico de embarcações.** Tráfico de embarcações a distâncias de até, aproximadamente 1500 km, constitui uma fonte dominante de ruído em frequências na faixa de 50 a 500 Hz.
- **Ondas de superfície.** As ondas de superfície são fontes de ruído com frequências que variam de 500 Hz a 25 kHz. Porém, o mecanismo que leva à formação deste ruído ainda é incerto. Há diversas linhas de pesquisa que se baseiam no estudo da cavitação provocada pelo colapso das bolhas de ar, formadas pela ação da turbulência associada a arrebentação de ondas na camada superior saturada de ar. Outras se baseiam no fluxo do vento próximo à superfície.
- **Ruído térmico.** Mellen[5] em 1952 mostrou, teoricamente, que o ruído térmico molecular comporta-se em altas frequências, limitando a sensibilidade do hidrofone na frequência máxima .

Em regiões de águas rasas, lagoas e baías, as fontes de ruído são altamente variáveis, tanto com o tempo, quanto de lugar para lugar. As principais fontes nesta região podem ser divididas em três grupos distintos: ruídos de navios e indústrias, ruído de ventos e ruído biológico. Na Fig. 3.3 pode-se observar valores quantitativos dos níveis de intensidade obedecendo condições distintas.

Portanto, com a intenção de reduzir o tempo de processamento de dados durante a execução do programa, sem afetar a precisão dos valores a serem calculados, foi implementada uma condição que indica quando o nível de intensidade sonora atinge o valor equivalente ao nível de ruído de fundo, podendo ser desprezado, não necessitando continuar os cálculos do

mapeamento da intensidade sonora com os raios envolvidos. De forma a simplificar o cálculo do valor do ruído de fundo adotou-se um valor pré-determinado de 40 dB, que corresponde ao menor valor de intensidade representado na Fig. 3.3, ou seja, quando o cálculo do valor da intensidade de um determinado raio for menor ou igual a 40 dB, será interrompido o cálculo do par de raios em questão e o algoritmo partirá para o cálculo de um novo par ou encerrará o programa quando for o último par de raios a ser calculado.

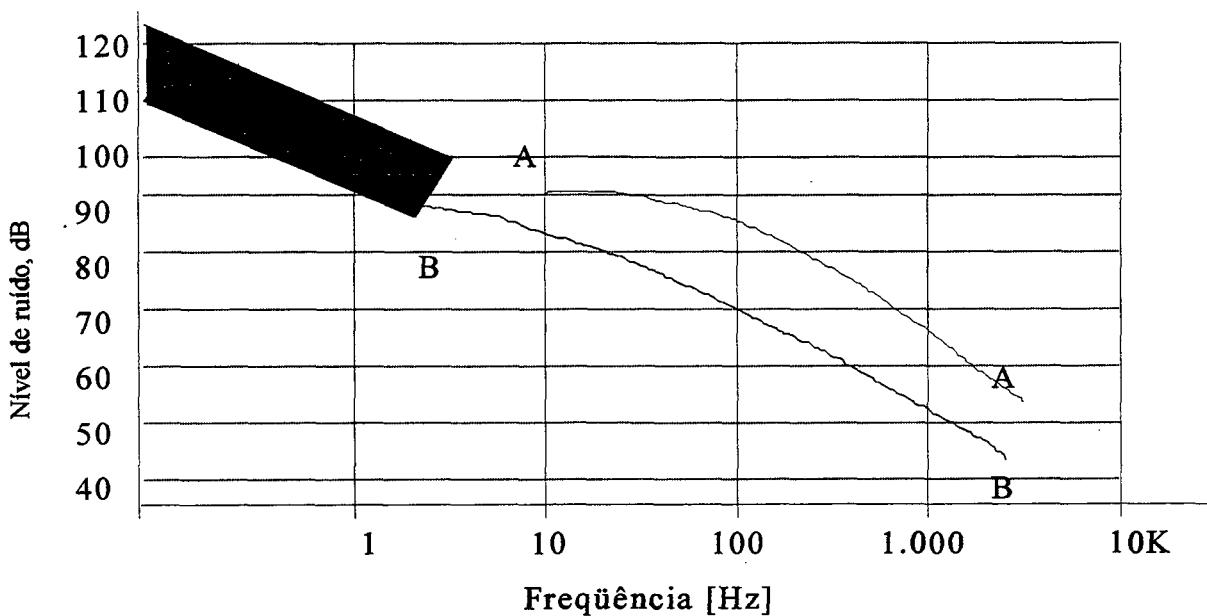


Figura 3.3 Espectro do nível de ruído em baías e portos. Curva AA representa o Porto de Nova York; valor medido durante o dia. Curva BB, a média e várias medições durante a Segunda Guerra. A área hachurada representa medições subsônicas de Knudsen, Alford e Emling[20].

Tal procedimento, após implementado, reduzido a uma fração do tempo e manteve-se a mesma precisão anterior.

Após um deslocamento elementar ds , do ponto $P_t(x_1, y_1)$, para uma nova posição $P_t'(x_1 + dx, y_1 + dy) = P_t'(x_2, y_2)$, veja Fig. 3.6, e através da Eq. 3.1 tem-se:

$$d\theta = \frac{ds}{R} \quad (3.5)$$

Do triângulo $P'P''P'''$, tem-se

$$dl = \frac{ds^2 g_r}{2c} \quad (3.6)$$

$$dP_t = [ds^2 + dl^2 + 2dsdl \cos(w)]^{1/2} \quad (3.7)$$

O valor de df , torna-se

$$df = \frac{dc/2}{\cos(d\theta/2)} \quad (3.8)$$

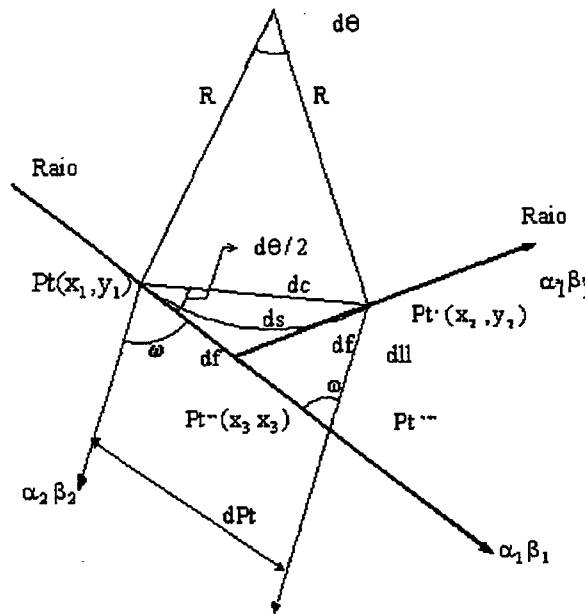


Figura 3.6 Representação geométrica do incremento de distância no traçado do raio.

As coordenadas da nova posição $P_t''(x_2, y_2)$ e $P_t'''(x_3, y_3)$ são:

$$x_2 = x_1 + dP \cos(\alpha_1) - dl \cos(\alpha_2) \quad (3.9)$$

$$y = y_1 + dP \cos(\beta_1) - dl \cos(\beta_2) \quad (3.10)$$

$$x_3 = x_1 + df \cos(\alpha_1) \quad (3.11)$$

$$y_3 = y_1 + df \cos(\beta_1) \quad (3.12)$$

As novas direções do raio são

$$\cos(\alpha_1') = \frac{(x_2 - x_3)}{df} \quad (3.13)$$

$$\cos(\beta_1') = \frac{(y_2 - y_3)}{df} \quad (3.14)$$

E o tempo transiente pode ser expresso como

$$t = ds/c \quad (3.15)$$

As Equações 3.11 e 3.12 permitem calcular as novas coordenadas de P' e, com as novas direções do raio, pode-se calcular o próximo incremento através destes dados obtidos.

Através do procedimento acima, foi criado um programa computacional para o cálculo do traçado de raios. Este programa requer a definição do perfil de velocidade, em duas dimensões, e o gradiente de velocidades g_x , g_y , a localização inicial (x,y) e a direção do raio (β).

Seguindo procedimento análogo ao das demais implementações, procurou-se elaborar o programa computacional para cálculo do traçado de raios de forma modular para permitir um melhor controle dos dados processados e maior intercambialidade para as modificações futuras. Utilizou-se a linguagem C++ por permitir um interfaceamento gráfico mais amigável e menor tempo de processamento dos dados.

No processamento computacional, primeiramente é definido o alcance máximo, em metros, o número de pontos para cálculo e o ângulo de ataque inicial. Através de funções pré-fixadas, são introduzidos os valores da velocidade sonora e da sua derivada. Os valores pontuais são calculados e gravados em arquivo para manipulações posteriores e, através de algoritmos

de apoio, são traçados os raios acústicos representando a propagação acústica de ondas sonoras individuais.

Os valores de saída possuem um conjunto de cinco colunas compostas das coordenadas (x,y), a velocidade do som $c(z)$, a profundidade do fundo nesta cota e o ângulo de ataque. Cada linha de cinco colunas forma a identificação de um determinado ponto, formando desta forma o mesmo número de linhas quanto a quantidade definida de pontos menos 1.

Todos os valores são armazenados com grau de precisão na sexta casa decimal, e todos os valores expressos no sistema de unidades SI.

Ao incidir em um meio com diferentes propriedades acústicas a onda sonora tende a refletir, penetrar e reverberar. Tal situação é analisada de acordo com as informações referentes ao fundo oceânico. Somente de posse das características dos meios envolvidos como os índices de refração e o ângulo de incidência que a frente de onda forma com a superfície, o processo de reflexão prossegue.

A relação da interferência de todas estas variáveis contribui para distintas condições de reflexão. A influência do ângulo de incidência está diretamente ligada ao ângulo crítico (θ_c).

$$\theta_c = \text{sen}(n) \quad (3.16)$$

na qual

$$n = c_1 / c_2 \quad (3.17)$$

Juntamente com o ângulo crítico há influência da relação de densidades e da própria velocidade sonora, como pode ser observado na formulação do ângulo crítico θ_c .

3.5- INTENSIDADE DE ONDA ACÚSTICA

A propagação de energia sonora considera que a energia potencial e cinética vibracional de um elemento fluído na trajetória de uma onda transmitente é nula antes e após a onda ter passado, prevendo que nenhuma transformação de energia não acústica tenha ocorrido. Assume-se também que nenhuma fonte de calor ou trabalho esteja presente, e que a condução de calor

seja desconsiderada com base na definição do trabalho mecânico. A taxa com que o trabalho é realizado é dada pelo produto escalar da força vetorial pela velocidade de partícula, que pode ser expressada por

$$dW/dt = \vec{F} \cdot \vec{u} = P \delta \vec{S} \cdot \vec{u} \quad (3.18)$$

onde $\delta \vec{S}$ é o vetor área que pode ser escrito como $\delta S \cdot \vec{n}$, onde \vec{n} é o vetor normal à superfície. A taxa de trabalho é expressa, matematicamente, como

$$(dW/dt) / \delta S = \vec{P} \cdot \vec{n} \quad (3.19)$$

na qual $\vec{u} \cdot \vec{n}$ é a componente da velocidade de partícula normal à superfície.

Define-se o vetor \vec{P} como sendo a intensidade sonora instantânea, simbolizada por $\vec{I}(t)$.

3.5.1 Uso do traçado de raio para cálculo da intensidade acústica

O principal propósito da construção do diagrama de raios é apresentar uma forma visual da intensidade acústica em diferentes pontos do meio em estudo. Esta representação se faz pelo traçado de vários raios, separados por pequenos incrementos angulares, de mesmos valores.

A intensidade acústica, em algum ponto no meio em questão, está relacionada com a separação de raios adjacentes. Para dois raios com separação angular inicial $\Delta\theta$, sendo um dos raios com ângulo inicial θ_0 , saindo da fonte localizada através das coordenadas cilíndricas pela posição $(0, z_0)$ como mostrado na Fig. 3.7.

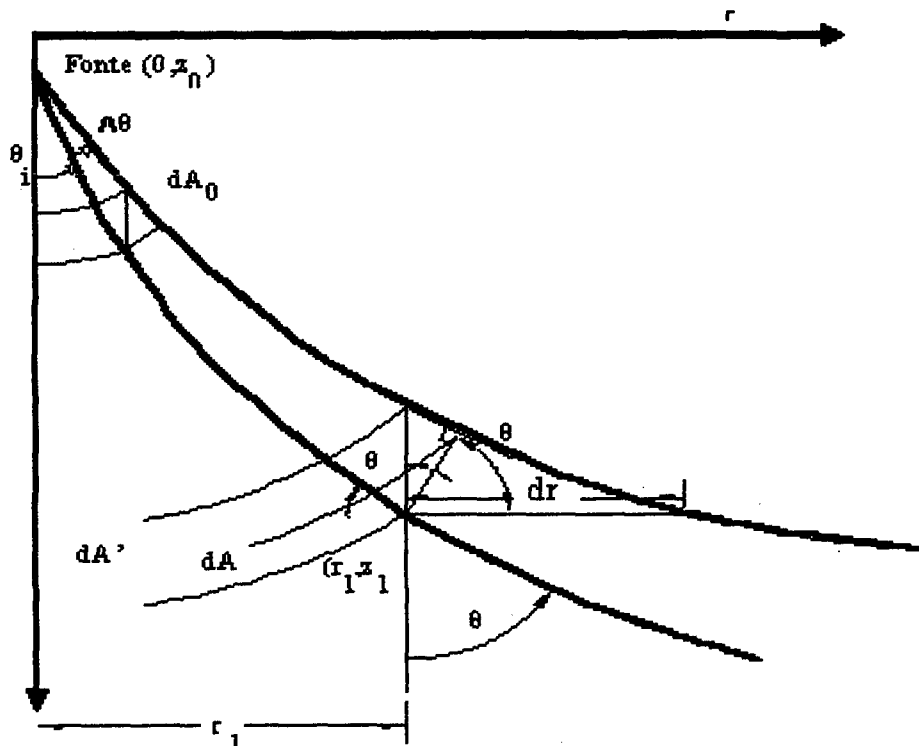


Figura 3.7 Geometria para o cálculo da intensidade acústica.

A uma distância $r_0 = 1$, tem-se

$$dA_0 = 2\pi \sin(\theta_i) d\theta \quad (3.20)$$

Propagando-se até uma nova posição (r_1, z_1) cujo ponto tem uma área de seção transversal dA e relacionando esta com a área dA' obtém-se

$$dA/dA' = \cos(\pi/2 - \theta) = \sin(\theta) \quad (3.21)$$

Mas o elemento de área dA' é dado por

$$dA' = 2\pi r_1 dz, \quad (3.22)$$

e pela Equação 3.21, torna-se

$$dA = \sin(\theta) dA' = 2\pi r_1 \sin(\theta) dz = 2\pi r_1 \cos(\theta) dr_1 \quad (3.23)$$

Representando a intensidade em uma distância unitária da fonte por I_0 e a intensidade na distância horizontal r_1 é I , então pelo princípio da conservação de energia implica que

$$I_0 dA_0 = I dA \quad (3.24)$$

Substituindo as Eq. 3.20 e 3.23 na Eq. 3.24 obtém-se

$$\frac{I}{I_0} = \frac{dA_0}{dA} = \frac{\sin(\theta_i) d\theta_i}{r_1 \cos(\theta) dr_1} = \frac{\sin(\theta_i) d\theta_i}{r \cos(\theta) dr} \quad (3.25)$$

desde que $dr_1 = dr$. Mas $r_1 = r_1(\theta, z)$, com isso tem-se

$$dr_1 = \frac{\partial r_1}{\partial \theta_i} d\theta_i + \frac{\partial r_1}{\partial z} dz = \frac{\partial r_1}{\partial \theta_i} d\theta_i \quad (3.26)$$

em uma profundidade fixa z . Substituindo a Eq. 3.26 na Eq. 3.25, pode-se observar que a intensidade acústica é dada por

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\sin(\theta_i)}{r \cos\left(\frac{\partial r}{\partial \theta_i}\right)} \quad (3.27)$$

O fator $1/r$ na Equação 3.28 implica no espalhamento dos raios acústicos através do distanciamento da fonte, que pode ser interpretado como aumento ou diminuição da intensidade conforme os raios se concentrem ou se espalhem ao longo da trajetória percorrida pelos mesmos.

Desta forma é implementado o cálculo dos valores da intensidade em todo o campo que os raios percorrem.

3.6 REFLEXÃO PELO FUNDO

Considera-se uma onda plana de amplitude unitária incidente em um meio homogêneo com densidade ρ e velocidade sonora c sobre um meio estratificado horizontalmente, como mostra a fig. 3.8. Recorda-se que a estratificação horizontal torna as propriedades do meio dependentes somente de uma coordenada, no caso z . Por conveniência, assume-se que a onda propaga-se no plano (x,z) e pressupõe a dependência harmônica com o tempo. O campo total $P_t(r,z)$ pode ser decomposto em um somatório do campo incidente $P_i(r,z)$ e do campo refletido $P_r(r,z)$, na forma

$$P_i(r,z) = P_i e^{ik(r \sin(\theta) - z \cos(\theta))}$$

$$P_r(r,z) = P_r e^{ik(r \sin(\theta) + z \cos(\theta))} \quad (3.28)$$

$$P_t(r,z) = P_i(r,z) + P_r(r,z) =$$

$$= P_i e^{ik(r \sin(\theta) - z \cos(\theta))} + P_r e^{ik(r \sin(\theta) + z \cos(\theta))} \quad (3.29)$$

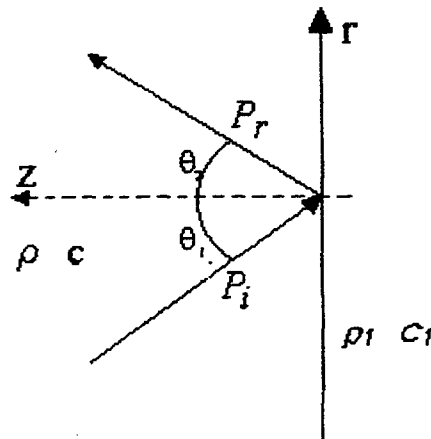


Figura 3.8 Reflexão de onda plana

A amplitude P_r do campo refletido pode ser obtido através do coeficiente de reflexão da onda plana, e é obtido pelas condições de contorno.

$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2} \quad (3.30)$$

Através da lei de Snell, Eq 3.30, pode-se provar, para condição de reflexão total, que:

$$\theta_1 = \theta_2 \quad (3.32)$$

3.6.1 Comportamento do coeficiente de reflexão

O coeficiente de reflexão pode ser expresso como a relação entre a onda incidente e onda refletida

$$R_f = \frac{P_r(r,z)}{P_i(r,z)} \quad (3.33)$$

No desenvolvimento do programa considerou-se fluidos homogêneos e o campo de pressão nos meios, conforme Fig. 3.9.

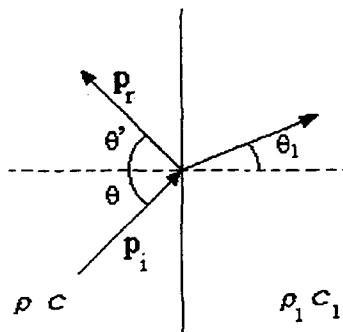


Figura 3.9 Incidência de onda plana em um meio homogêneo

$$P_i(r,z) = P_i e^{ik(-z \cos(\theta_1) - r \sin(\theta_1))} \quad (3.34)$$

Sendo a componente normal da velocidade contínua em $z=0$, obtém-se,

$$\frac{P_i(r,z)}{\rho c} \cos(\theta) - \frac{P_r(r,z)}{\rho c} \cos(\theta) = \frac{P_t(r,z)}{\rho_1 c_1} \cos(\theta_1) \quad (3.35)$$

Utilizando a Lei de Snell e resolvendo a Eq. 3.35

$$P_r(r,z) = \frac{\frac{\rho_1 c_1 - \rho c}{\cos(\theta_1) \cos(\theta)}}{\frac{\rho_1 c_1 + \rho c}{\cos(\theta_1) \cos(\theta)}} P_i(r,z) \quad (3.36)$$

$$P_r(r,z) = R_f P_i(r,z)$$

$$R_f = \frac{\frac{\rho_1 c_1 - \rho c}{\cos(\theta_1) \cos(\theta)}}{\frac{\rho_1 c_1 + \rho c}{\cos(\theta_1) \cos(\theta)}} \quad (3.37)$$

Na implementação do módulo para cálculo do coeficiente de reflexão foram utilizados como entrada de dados, além do ângulo de incidência θ , os seguintes parâmetros

$$n = \frac{c}{c_1} \quad (3.38)$$

$$m = \frac{\rho_1}{\rho} \quad (3.39)$$

onde n e m são os índices de refração.

Segue abaixo fluxograma do módulo

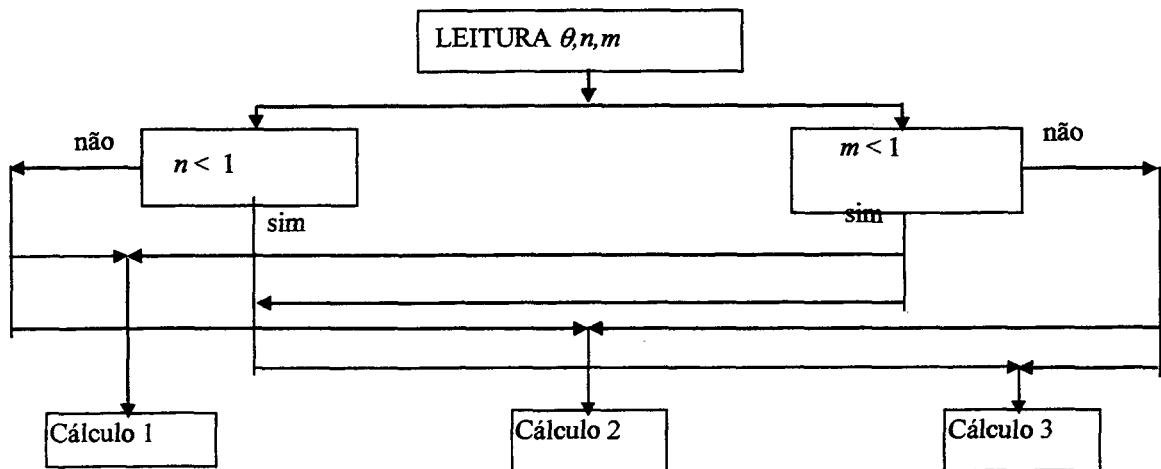


Figura 3.10 Fluxograma do módulo coeficiente de reflexão

3.6.2 Reflexão na interface Água-Ar - Cálculo 1.

Refere-se à condição em que $n > 1$ e $m < 1$, e substituindo n e m na Eq. 3.39, rescreve-se da seguinte forma

$$R_f = \frac{m \cos(\theta) - n \cos(\theta_1)}{m \cos(\theta) + n \cos(\theta_1)} \quad (3.40)$$

Reagrupando os termos

$$R_f = +1 - 2 \left(\frac{1}{1 + \frac{m \cos(\theta)}{n \cos(\theta_1)}} \right) \quad (3.41)$$

Como $n > 1$ e $m < 1$ e $\cos(\theta_1) > \cos(\theta)$, obtém-se

$$\frac{m \cos(\theta)}{n \cos(\theta_1)} < 1 \quad (3.42)$$

Do desenvolvimento de séries [21] pode-se escrever

$$\text{Expandindo } R_f \quad \frac{1}{1+Z} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n Z^n \quad \text{para } |Z| < 1 \quad \text{chega-se à expressão} \quad (3.43)$$

$$R_f = -1 + 2 \frac{m \cos(\theta)}{n \cos(\theta_1)} - 2 \left(\frac{m \cos(\theta)}{n \cos(\theta_1)} \right)^2 + \dots \quad (3.44)$$

A equação implementada é :

$$R_f \cong -1 + 2 \frac{m \cos(\theta)}{n \cos(\theta_1)} - 2 \left(\frac{m \cos(\theta)}{n \cos(\theta_1)} \right)^2 \quad (3.45)$$

3.6.3 Reflexão na interface Água-Fundo - Cálculo 2.

A condição $m > n > 1$, indica uma maior descontinuidade na densidade do que na velocidade do som na superfície. Esta situação ocorre, por exemplo, na interface água-fundo para sedimentos marinhos. Um aumento substancial na densidade é acompanhado por um pequeno decaimento da velocidade. Esta zona de baixa velocidade do fundo pode persistir até 30m na coluna de sedimento, posteriormente a igualdade da velocidade e finalmente excede a velocidade na água.

Ocorre neste caso o fenômeno de transmissão total, quando o ângulo de ataque $\theta = \theta_B$.

$$\theta_B = \sin^{-1} \sqrt{\frac{m^2 - n^2}{m^2 - 1}} \quad (3.46)$$

onde θ_B é o ângulo acústico de Brewster [17].

Um ângulo real Brewster pode também ocorrer para os parâmetros $m < n < 1$, porém esta condição não é um caso de interesse físico.

Para $\theta < \theta_B$,

$$\frac{n \cos(\theta_1)}{m \cos(\theta)} < 1 \quad (3.47)$$

Expandindo R_f obtém-se

$$R_f = 1 - 2 \frac{n \cos(\theta_1)}{m \cos(\theta)} + 2 \left(\frac{n \cos(\theta_1)}{m \cos(\theta)} \right)^2 + \dots \quad (3.48)$$

Para $\theta > \theta_B$, a desigualdade da Eq. 3.42 se repete e utiliza-se a Eq. 3.45.

3.6.4 Reflexão na interface Água-Fundo - Cálculo 3.

Condição: $n < 1$ e $m > 1$. Esta é uma situação de ocorrência freqüente no leito oceânico, onde a velocidade sonora e a densidade aumentam da interface água-fundo para o solo. Sobre estas condições, ao aumentar o ângulo de incidência, o ângulo da onda transmitida tende, também, a aumentar. Este

crescimento cessa quando o ângulo de incidência atinge o ângulo crítico θ_c . A partir deste ponto a onda é totalmente refletida.

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} n \quad (3.49)$$

Para $\theta < \theta_c$, a desigualdade dada pela Eq. 3.47 é verdadeira e a Eq. 3.48 se aplica nesta condição.

Para $\theta = \theta_c$ a reflexão é total e real $R_f = 1$.

Para $\theta > \theta_c$, tem-se R_f como um número complexo. Para o desenvolvimento, através da Lei de Snell (Eq. 2.3) e algumas manipulações, obtém-se

$$\text{sen}(\theta_1) = \frac{\text{sen}(\theta)}{n} \quad (3.50)$$

$$\cos(\theta_1) = \left[1 - \left(\frac{\text{sen}(\theta)}{n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.51)$$

$$\begin{aligned} n \cos(\theta_1) &= \left[n^2 - \text{sen}^2(\theta) \right]^{1/2} \\ &= \left[(-1)(\text{sen}^2(\theta) - n^2) \right]^{1/2} \\ &= \pm i (\text{sen}^2(\theta) - n^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (3.52)$$

Portanto R_f torna-se

$$R_f = \frac{m \cos(\theta) - i \sqrt{\text{sen}^2(\theta) - n^2}}{m \cos(\theta) + i \sqrt{\text{sen}^2(\theta) - n^2}} \quad (3.53)$$

CAPÍTULO 4

VALIDAÇÃO DO MODELO IMPLEMENTADO

Antes de serem realizadas as análises com o programa implementado se faz necessário verificar, através de comparações, o comportamento dos resultados deste, com os modelos já testados e avaliados, disponíveis na literatura.

Para uma correta validação deste modelo foi, inicialmente, desenvolvida e implementada uma solução analítica dependente da distância e de inclinação qualquer, conforme orientações de Buckingham[14]. Posteriormente foram comparados os dados apresentados por esta solução analítica com resultados de modelos da literatura. Após checagem da precisão dos resultados analíticos, estes foram utilizados para comparação do programa implementado de acústica de raios.

4.1 SOLUÇÃO ANALÍTICA

Considera-se uma fonte pontual com coordenadas cilíndricas $r_0 = (r_0, \theta_0, z_0)$ localizada em uma cunha de infinita extensão na direção z , como mostrado na Fig. 4.1. A porção interior da cunha é um fluido homogêneo, com densidade constante ρ e velocidade sonora c .

Os contornos da cunha são assumidos Água-Ar em $\theta = 0$, referente à superfície, e Água-Fundo em $\theta = \beta$, referido ao ângulo da cunha, formado pelo fundo oceânico. Então, a equação da onda não homogênea, independente do tempo é dada por

$$\nabla^2 P(r) + k^2 P(r) = -4\pi \frac{\delta(r - r_0)}{r} \delta(\theta - \theta_0) \delta(z) \quad (4.1)$$

onde $r = (r, \theta, z)$ e o número de onda $k = \omega/c$. Desenvolvendo-se o Laplaciano para coordenadas cilíndricas obtém-se

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial P(r, \theta, z)}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 P(r, \theta, z)}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 P(r, \theta, z)}{\partial z^2} + kP(r, \theta, z) = -4\pi \frac{\partial(r-r_0)}{r} \delta(\theta - \theta_0) \delta(z) \quad (4.2)$$

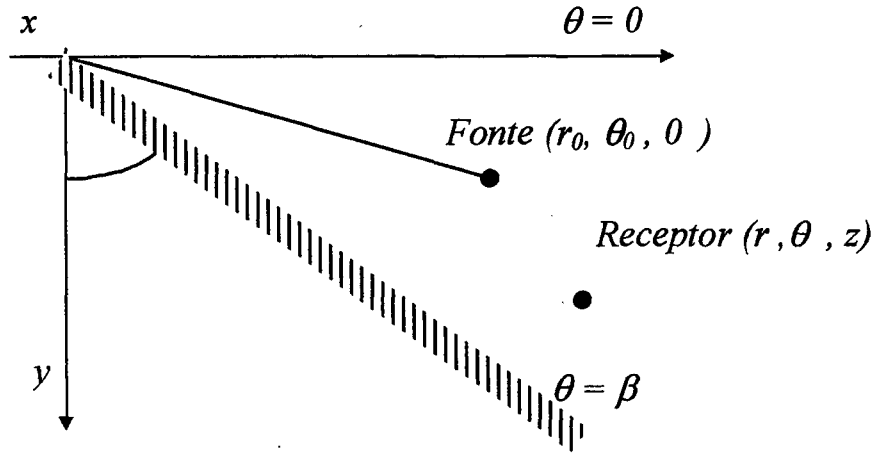


Figura 4.1 Representação das coordenadas cilíndricas utilizadas para resolução do sistema analítico.

Aplicando a transformação inversa de Fourier[22] em ambos os lados da equação 4.2, obtém

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial g(r, \theta, k_z)}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 g(r, \theta, k_z)}{\partial \theta^2} + k_z^2 g(r, \theta, k_z) = -2\sqrt{2\pi} \frac{\partial(r-r_0)}{r} \delta(\theta - \theta_0) \quad (4.3)$$

onde $P(r, \theta, z)$ e $g(r, \theta, k_z)$ são os pares conjugados da Transformada de Fourier.

Para resolver a Eq. 4.3, assume-se uma expansão de autofunções na forma

$$g(r, \theta; k_z) = \sum_n a_n(\theta_0) f_n(\theta) R_n(r) \quad (4.4)$$

substituindo na Eq. 4.3,

$$\begin{aligned} \sum_n a_n(\theta_0) \left\{ \frac{f_n(\theta)}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{dR_n(r)}{dr} \right] + \frac{R_n(r)}{r^2} \frac{d^2 f_n(\theta)}{d\theta^2} + k_r^2 f_n(\theta) R_n(r) \right\} \\ = \sum_n \left\{ -2\sqrt{2\pi} \frac{\delta(r-r_0)}{r} f_n(\theta_0) f_0(\theta) \right\} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Como a Eq. 4.5 deve manter-se correta para valores arbitrários de r , θ , e θ_0 , e igualando separadamente as funções de r , θ e θ_0 na esquerda e na direita da equação, obtém-se.

$$a_n(\theta_0) = f_n(\theta_0) \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{f_n(\theta)}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{dR_n(r)}{dr} \right] + \frac{R_n(r)}{r^2} \frac{d^2 f_n(\theta)}{d\theta^2} + k_r^2 f_n(\theta) R_n(r) \\ = -2\sqrt{2\pi} \frac{\delta(r-r_0)}{r} f_n(\theta) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Dividindo-se ambos lados da Eq. 4.7 por $f_n(\theta) R_n(r)/r$, obtém-se

$$\frac{r}{R_n(r)} \frac{d}{dr} \left[r \frac{dR_n(r)}{dr} \right] + \frac{1}{f_n(\theta)} \frac{d^2 f_n(\theta)}{d\theta^2} + k_r^2 r^2 = -2\sqrt{2\pi} \frac{r\delta(r-r_0)}{R_n(r)} \quad (4.8)$$

que pode ser escrita como

$$\frac{r}{R_n(r)} \frac{d}{dr} \left[r \frac{dR_n(r)}{dr} \right] + k_r^2 r^2 + 2\sqrt{2\pi} \frac{r\delta(r-r_0)}{R_n(r)} = -\frac{1}{f_n(\theta)} \frac{d^2 f_n(\theta)}{d\theta^2}. \quad (4.9)$$

Foram aqui agrupadas as funções de r no lado esquerdo e todas as funções de θ no lado direito. A Eq. 4.9 deve manter correta para valores arbitrários de r e θ , por isso, os lados direito e esquerdo da Eq. 4.10 podem separadamente serem igualados por uma constante.

$$\frac{d^2 f_n(\theta)}{d\theta^2} + \alpha^2 f_n(\theta) = 0 \quad (4.10)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{dR_n(r)}{dr} \right] + \left(k_r^2 - \frac{\alpha^2}{r^2} \right) R_n(r) = -2\sqrt{2\pi} \frac{\delta(r-r_0)}{r} \quad (4.11)$$

A Eq. 4.10 possui uma solução

$$f_n(\theta) = A_n \sin(\alpha\theta) + B_n \cos(\alpha\theta) \quad (4.12)$$

Onde A_n e B_n são constantes arbitrárias. Impondo a condição de reflexão na superfície, condição em $\theta = 0$ na Eq. 4.12,

$$p(r, \theta, z) \Big|_{\theta=0} = 0 \Rightarrow f_n(\theta) \Big|_{\theta=0} = 0 \quad (4.13)$$

tem-se que $B_n = 0$, quando $\theta = \beta$, no fundo

$$\frac{\partial p(r, \theta, z)}{\partial n} \Big|_{\theta=\beta} = \frac{\partial p(r, \theta, z)}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\beta} = 0 \Rightarrow \frac{df_n(\theta)}{d\theta} \Big|_{\theta=\beta} = 0 \quad (4.14)$$

tem-se

$$\begin{aligned} f_n(\theta) &= A_n \sin(\alpha_n \theta), \\ \alpha_n &= \frac{(n-1/2)\pi}{\beta}, \\ n &= 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (4.15)$$

Combinando a Eq. 4.10 com 4.13 e 4.14, e normalizado as auto-funções,

$$1 = \int_0^\beta A_n^2 \sin^2(\alpha_n \theta) d\theta = \frac{1}{2} \int_0^\beta A_n^2 (1 - \cos(2\alpha_n \theta)) d\theta = \frac{A_n^2 \beta}{2} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} f_n(\theta) &= \sqrt{\frac{2}{\beta}} \sin(\alpha_n \theta), \\ \alpha_n &= \frac{(n-1/2)\pi}{\beta}, \\ n &= 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (4.17)$$

Rescrevendo a Eq. 4.11, obtém-se

$$\frac{x}{2\sqrt{2\pi}} \left[\frac{d^2 R_n(x)}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dR_n(x)}{dx} + \left(1 - \frac{\alpha_n^2}{x^2} \right) R_n(x) \right] = -\delta(x - x_0) \quad (4.18)$$

Cuja solução:

$$R_n(x, x_0) = \begin{cases} -\frac{1}{C} R_n^{(0)}(x) R_n^{(\infty)}(x_0), & 0 \leq x \leq x_0, \\ -\frac{1}{C} R_n^{(0)}(x_0) R_n^{(\infty)}(x), & x_0 \leq x \leq \infty, \end{cases} \quad (4.19)$$

onde,

$$\begin{aligned} C &= \frac{x_0}{2\sqrt{2\pi}} W[R_n^{(0)}(x_0), R_n^{(\infty)}(x_0)] \\ &= \frac{x_0}{2\sqrt{2\pi}} [R_n^{(0)}(x_0) R_n^{(\infty)}(x_0) - R_n^{(0)}(x_0) R_n^{(\infty)}(x_0)] \end{aligned} \quad (4.20)$$

Aqui $R_n^{(0)}(x)$ e $R_n^{(\infty)}(x)$ satisfaz a versão homogênea de 4.18

$$\frac{d^2 R_n(x)}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dR_n(x)}{dx} + \left(1 - \frac{\alpha_n^2}{x^2} \right) R_n(x) = 0 \quad (4.21)$$

Mas a Eq. 4.21 é uma simples equação de Bessel de ordem α_v . Requer-se que $R_n(x)$ seja finita (especialmente, zero) em $x = 0$ e que $R_n(x)$ satisfaça o campo distante em $x = \infty$, e obtém-se assim

$$R_n^{(0)}(x) = J_{a_n}(x), R_n^{(\infty)}(x) = J_{a_n}^{(1)}(x), C = \frac{i}{\sqrt{2\pi}^{3/2}} \quad (4.22)$$

onde J é uma função de Bessel e H é uma função de Hankel de primeiro tipo. A equação 4.19 torna-se:

$$R_n(r) = i\sqrt{2\pi}^{3/2} J_{a_n}(k_r r_<) H_{a_n}^{(1)}(k_r r_>), 0 \leq r < \infty \quad (4.23)$$

onde $r_<$ ($r_>$) é o menor (maior) de r e r_0 . Combinado as Eqs. 4.2, 4.2, 4.5, 4.16 e 4.22 obtém-se a solução completa para uma fonte pontual, situada num corpo d'água, em cunha com o fluido homogêneo e contornos impenetráveis.

Na Fig.4.2 está representado o campo acústico da solução analítica implementada, este apresentou o mesmo comportamento proposto por Buckingham[14].

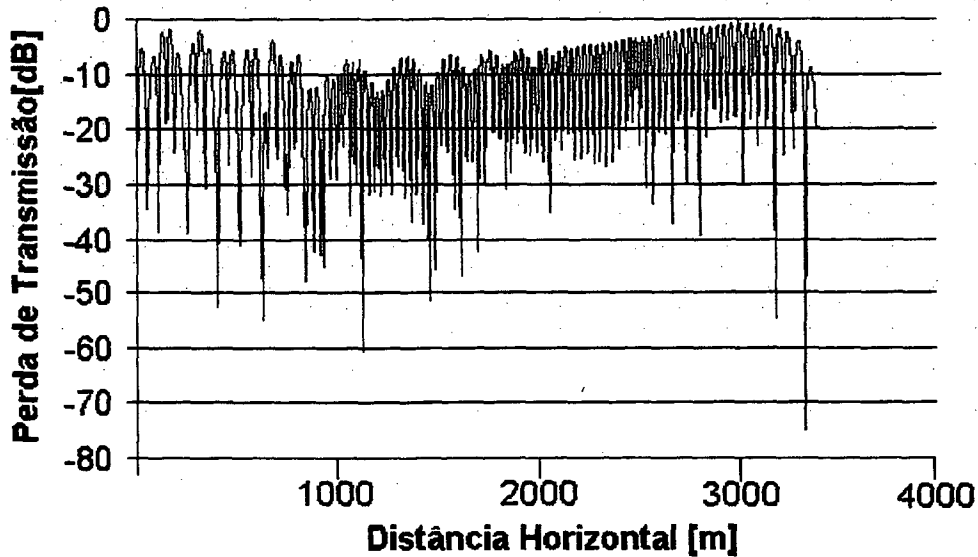


Figura 4.2 Solução analítica para condição de fundo inclinado $2,86^\circ$, propagação upward, perfil de velocidade constante = 1500 m/s, 1000 pontos de leitura dos dados, fonte a 100m, array a 30m, frequência 25 Hz

Na Fig. 4.3 está plotado o comportamento do programa de acústica de raios, obedecendo as mesmas condições de contorno da solução analítica proposta por Buckingham[14], conjugado com a solução analítica

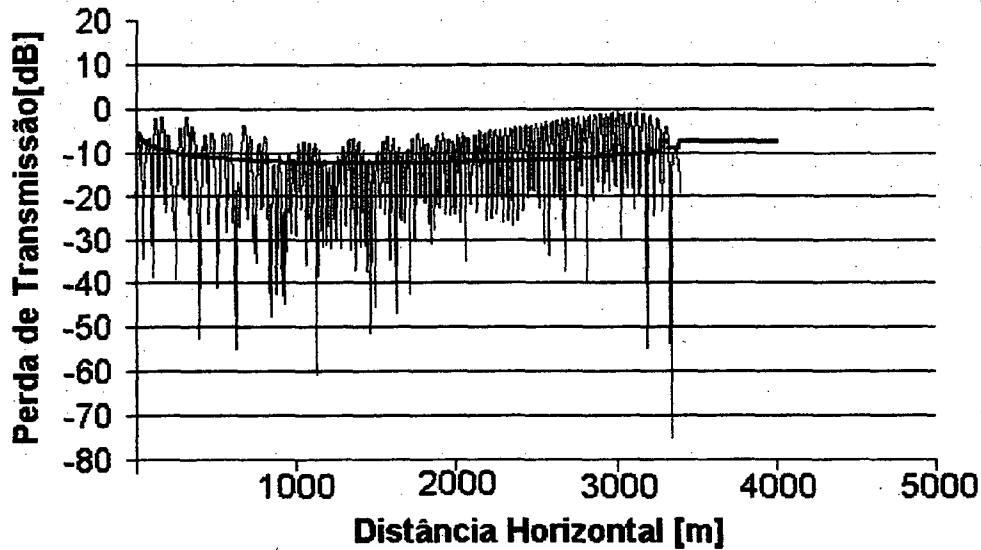


Figura 4.3 Solução por acústica de raios e solução analítica para condição de fundo inclinado $2,86^\circ$, propagação upward, perfil de velocidade constante = 1500 m/s, 1000 pontos de leitura dos dados, fonte a 100m, array a 30m, frequência 25 Hz

Na Fig.4.4 está o comportamento do campo acústico sob as mesmas condições de contorno, variando apenas a frequência. Observa-se um funcionamento melhor para regiões afastadas da fonte, do que próximas desta. Esta região de transição se dá aproximadamente em torno de 1500m. .

Na Fig.4.5 apresenta o comportamento do campo acústico considerando o fundo plano e solução analítica proposta por Brekhovskikh [18]. Observa-se uma coerência entre os dados apresentados.

Em termos gerais, o Programa de Acústica de Raios (P.A.S.) apresentou-se orientativo para o mapeamento do campo acústico conforme pode-se observar nas Fig.4.3, Fig.4.4 e Fig.4.5.

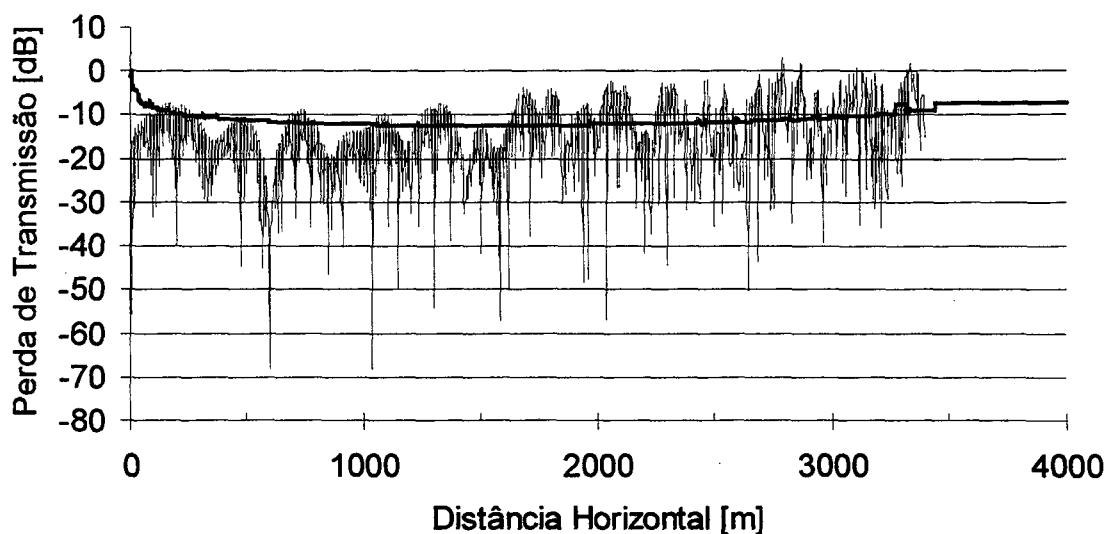


Figura 4.4 Solução por acústica de raios e solução analítica para condição de fundo inclinado $2,86^\circ$, propagação upward, perfil de velocidade constante = 1500 m/s, 1000 pontos de leitura dos dados, fonte a 100m, array a 30m, frequência 125 Hz

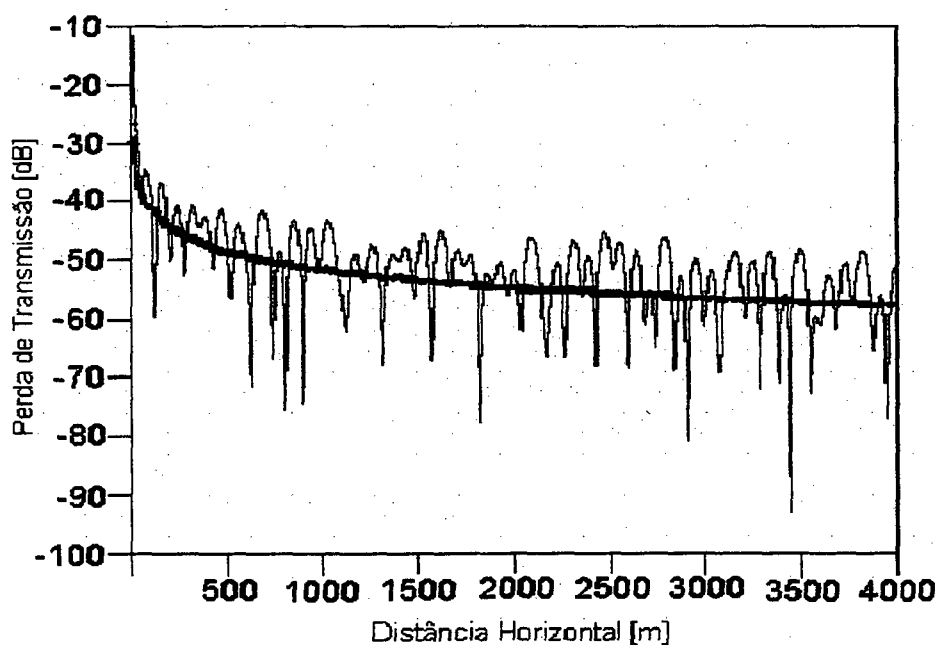


Figura 4.5 Solução por acústica de raios e solução analítica para condição de fundo plano 200m, perfil de velocidade constante = 1500 m/s, 1000 pontos de leitura dos dados, fonte a 100m, array a 100m, frequência 25 Hz.

CAPÍTULO 5

ESTUDOS DE CASOS

Neste capítulo, será estudado o comportamento do Método de Acústica de Raios através do Programa de Acústica Submarina (PAS), mediante combinações das variáveis envolvidas, análises comparativas e comprobatórias. Observa-se que em todas as variáveis analisadas, as alterações foram feitas no PAS, dentro dos módulos das respectivas variáveis. Desta forma podem-se realizar as análises pretendidas dentro de um único programa base, e permitindo variações em uma variável, sem a interferência nas demais.

A discretização do meio, que no PAS está relacionado com a quantidade de pontos verticais e horizontais, é analisado no sentido de se obterem as condições ideais, sendo estas compostas pelo menor tempo de processamento e melhor precisão. Procurou-se também apresentar as principais características que envolvem esta variável.

A reflexão de uma onda foi analisada desde a condição de reflexão especular até condições mais realistas, em que a reflexão assume, na maioria das vezes, caráter não especular. Estas análises foram realizadas mediante plotagem do comportamento do campo acústico em função da distância horizontal em uma dada cota vertical. Os índices de refração, como variáveis da reflexão não especular, também foram analisados. Procurou-se observar as tendências de acordo com combinações de valores dos índices de refração com o comportamento do campo acústico.

As posições da fonte e do receptor foram relacionadas aos diferentes tipos de fundo, perfis de velocidade e condições de reflexão. Procurou-se observar as condições ideais e as influências destas variáveis no traçado de raios e no comportamento do campo acústico.

Procurou-se também trabalhar com formas variadas de fundo submarino, a fim de verificar o comportamento do traçado de raios e conhecer seus limites quanto a esta variável. As condições físicas daquele não entraram nesta análise mas somente no estudo das condições de reflexão.

O intervalo angular e a variação angular são analisados quanto à influência destes na representatividade do campo acústico, buscando assim meios que possam identificar suas principais características e tendências. Procurou-se relacioná-los com o tipo de fundo, perfil de velocidade e condições de reflexão.

Quanto ao perfil de velocidade, foram considerados perfis com velocidade constante ao longo de toda profundidade a perfis compostos de até 05 funções, de ordem quatro. Procurou-se comparar a propagação sonora nestes diferentes perfis e identificar suas principais características.

Os dados obtidos pelo PAS resultaram inicialmente do mapeamento acústico de toda a região de análise. Os dados gerados eram formados por pontos equidistantes nas direções vertical e horizontal. Posteriormente foram adotadas algumas simplificações, conforme publicado por Buckingham [14], que adotou como fonte receptora uma linha imaginária com pontos equidistantes somente na horizontal, em uma determinada profundidade.

5.1- QUANTIDADE DE PONTOS

A quantidade de número de pontos é um fator importante que determina a relação entre precisão e tempo de processamento. Como o Modelo de Acústica de Raios tem uma de suas principais características o reduzido tempo de processamento, procurou-se trabalhar com condições favoráveis a esta característica, sem deixar de representar satisfatoriamente o meio oceânico. Outro fator que é influenciado por esta variável é a frequência da onda propagada. A frequência é inversamente proporcional ao número de pontos, sendo necessário um maior número de pontos à medida que se reduz a frequência.

Devido à arquitetura do PAS, ao se analisar a quantidade de pontos pode-se separar em duas frentes distintas. Uma é a quantidade de pontos utilizada para gerar o traçado de raios. A segunda refere-se ao cálculo da intensidade nos pontos de uma malha ou linha de leitura em determinada cota

de profundidade. Através da Fig. 5.1 pode-se observar com mais detalhe o perfil apresentado por Urick[4] e utilizado para estes testes.

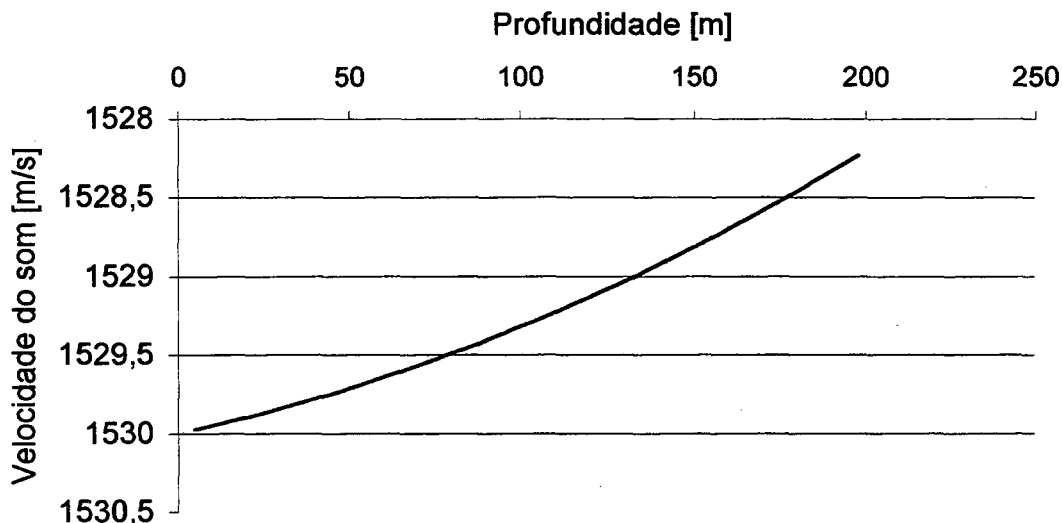


Figura 5.1 Perfil de velocidades utilizado na geração do Traçado de Raios

5.1.1 Influência da quantidade de pontos na geração do traçado de raios

Devido à arquitetura de construção do PAS, a quantidade de pontos está diretamente relacionada ao espaçamento entre os pontos gerados, pois o alcance máximo é fixo e o incremento de deslocamento é função da relação do alcance máximo com o número de pontos.

Pode-se verificar, comparando as Fig. 5.2 e 5.3, que devido ao menor número de pontos, a linha do traçado de raios da Fig. 5.3 deixa de percorrer algumas regiões, especificadamente as regiões de reflexão, fundo e superfície. Este fato leva ao sombreamento destas regiões de interesse, porém não foi observado mudanças nas demais regiões.

Utilizando 1000 pontos foi gerado um arquivo de 56kbytes, 500 pontos geraram 28kbytes e 100 pontos 5,7kbytes. Portanto o espaço ocupado por estes arquivos e consequentemente o tempo de processamento são diretamente proporcionais ao número de pontos utilizados.

O alcance a ser atingido também está ligado a esta quantidade de pontos. Esta variável torna-se muito importante por determinar um limite de propagação. Este valor deve ser analisado individualmente para cada configuração física do oceano, pois quanto menor for o alcance, mais discretizada estará a região de interesse.

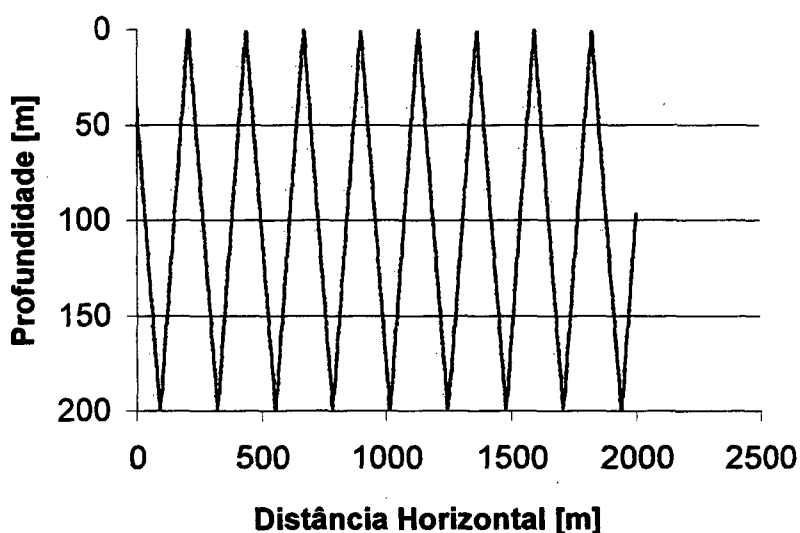


Figura 5.2 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte a 40m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 1000 pontos gerados e fundo plano com profundidade 200m.

À medida que se reduz a lâmina de água e se conservam as outras variáveis constantes, como se pode observar nas Fig 5.4, Fig. 5.5 e Fig. 5.6, a região de mascaramento, ou seja, a região que não é percorrida pelos raios acústicos mas faz parte do campo acústico, passa a ser cada vez mais representativa do que a região percorrida pelos raios acústicos. Ou seja, quanto menor for a espessura da lâmina de água, também menor deverá ser o espaçamento entre os pontos.

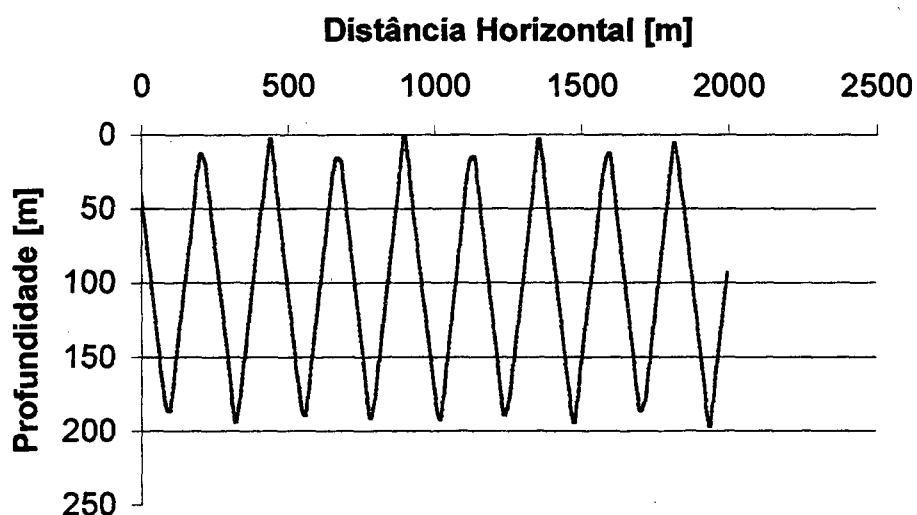


Figura 5.3 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte a 40m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 100 pontos gerados e fundo plano com profundidade 200m.

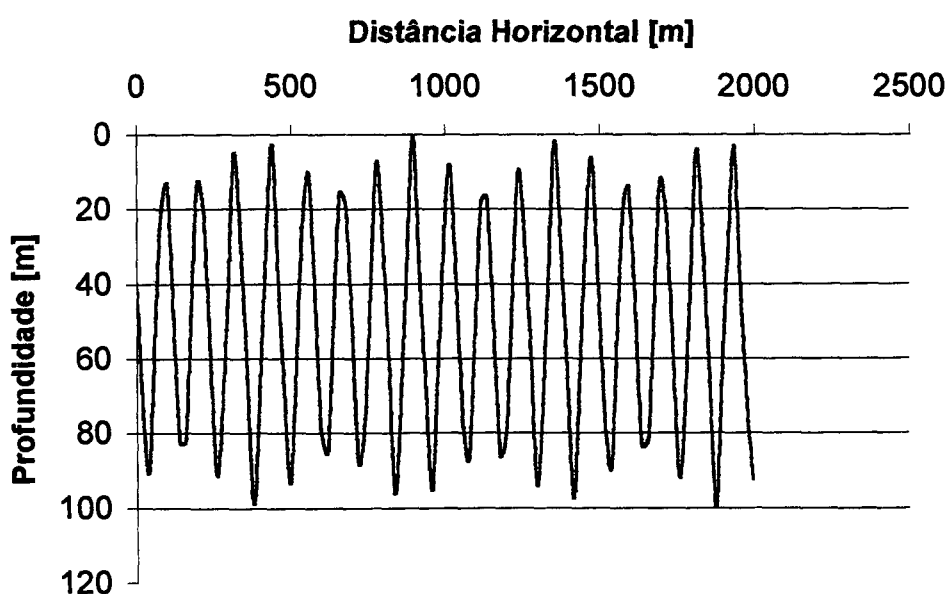


Figura 5.4 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte a 40m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 100 pontos gerados e fundo plano com profundidade 100m.

Comparando as Fig. 5.5 e Fig. 5.7 observa-se um aumento significativo do campo acústico na Fig. 5.7, entre as cotas de 5m e 45m. Isto ocorreu devido à utilização de uma quantidade de pontos mais apropriada, no caso 1000 pontos. Eliminando assim a região de mascaramento que se deve, portanto, a um problema exclusivo de discretização do meio em questão.

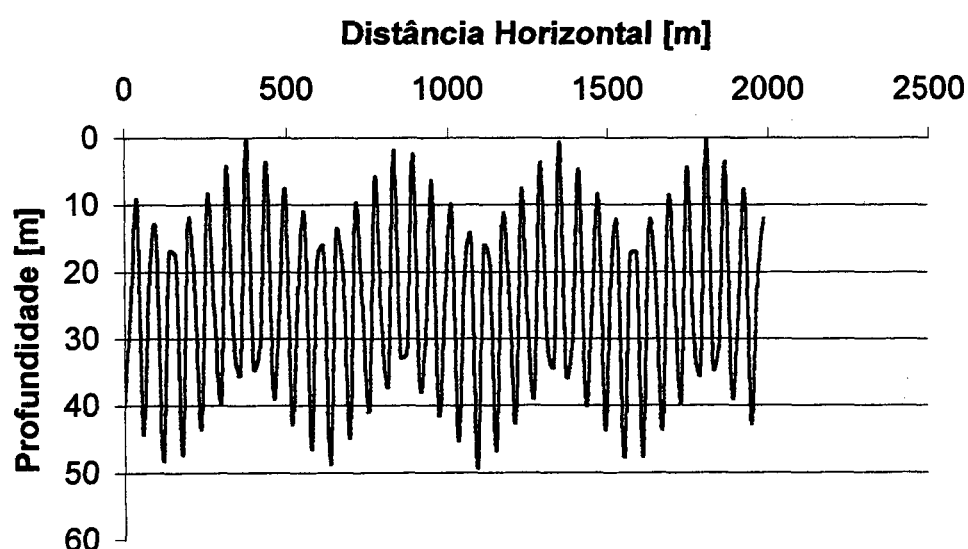


Figura 5.5 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte a 40m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 100 pontos gerados e fundo plano com profundidade 50m.

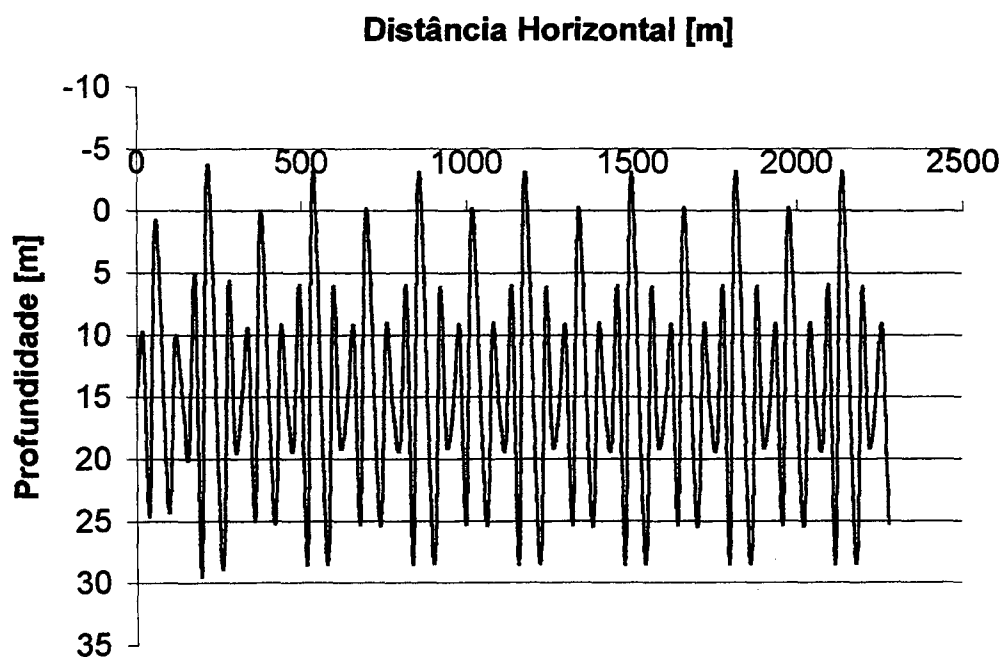


Figura 5.6 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte a 15m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 100 pontos gerados e fundo plano com profundidade 30m.

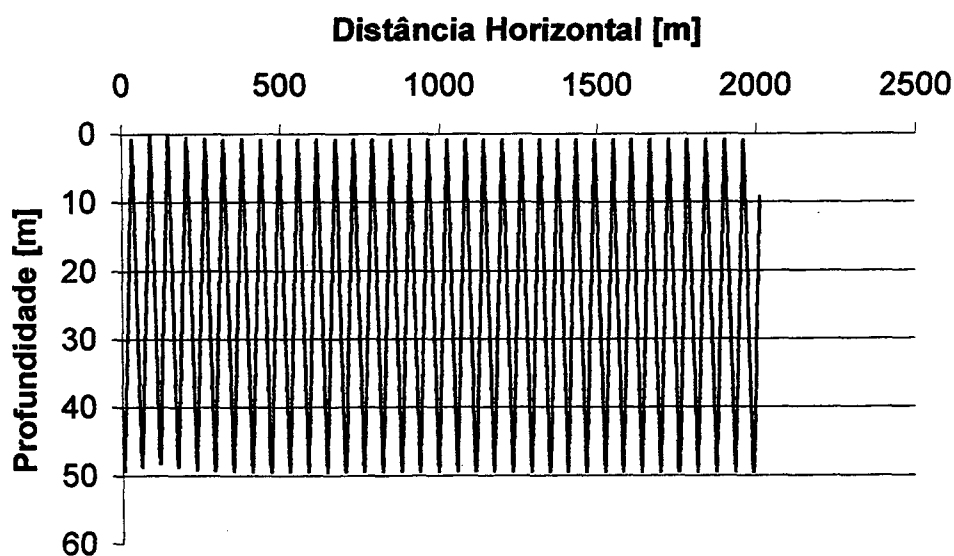


Figura 5.7 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte a 40m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 1000 pontos gerados e fundo plano com profundidade 50m.

5.1.2 Influência da quantidade de pontos no mapeamento acústico

Como padrão orientativo trabalhou-se inicialmente com 100 pontos, ou 100 linhas, ao longo de uma linha vertical imaginária, que liga a superfície ao fundo de maior profundidade. Neste caso trabalhou-se com uma lâmina de profundidade constante 200 m. Esta quantidade de pontos (100) foi baseada nos resultados do trabalho de Buckingham [14] e procurou-se variar acima e abaixo, em torno deste valor. Estes pontos correspondem ao mesmo número de linhas horizontais, sendo, portanto, um indicativo da discretização do meio.

Conservando o número de pontos horizontais em 10.000 e variando os verticais, observou-se que ao trabalhar com menos pontos houve geração de arquivos maiores. Ou seja, os arquivos foram inversamente proporcionais a quantidade de pontos verticais. Este fato pode ser confirmado ao se analisar a malha em que estes pontos foram gerados. Como o caso analisado, em que a profundidade é 200 m, e primeiramente utilizou-se 100 pontos verticais e posteriormente 80, 50 e 20, respectivamente. Para um array a 100 m de profundidade terá como valores todos os pontos localizados dentro das seguintes faixas de profundidade: 99-101, 98.75-101.25, 98-102 e 95-105.

Na Fig. 5.8 e Fig. 5.9 pode-se observar as condições básicas em que se baseou, para realização dos presentes estudos e comportamento acústico destas condições, respectivamente.

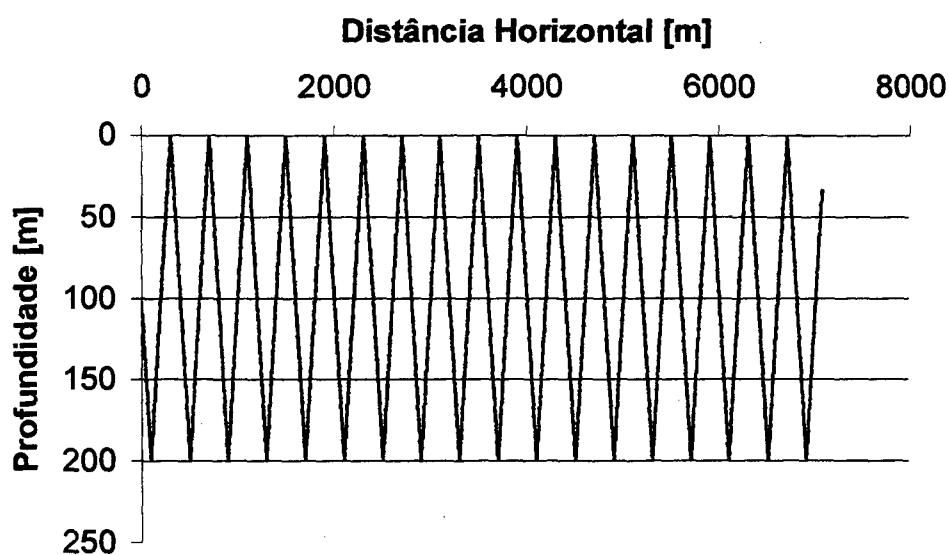


Figura 5.8 Traçado de raios com ângulo de ataque 30° , fonte e receptor a 100m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão especular, 10000 pontos gerados e fundo plano com profundidade 200m.

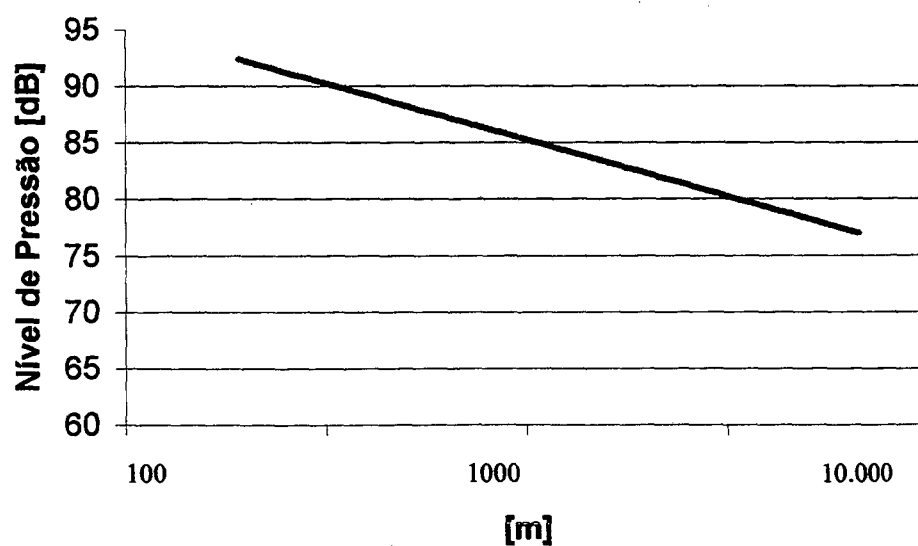


Figura 5.9 Variação do nível de pressão sonora com a distância percorrida R, com as condições da Fig. 5.8.

5.2- CONDIÇÕES DE REFLEXÃO

Uma das principais variáveis envolvidas no processo de propagação sonora é a condição de reflexão, ela está diretamente ligada às características reais do meio em questão. Também pode-se relacionar esta condição com a frequência, conforme Etter [19], mas procurou-se relacionar o tempo de processamento de uma condição simplificada com uma condição mais realista e também características da propagação sonora em função dos meios de contorno.

Através da Fig.5.11 observa-se a diferença na utilização da condição simplificada de reflexão especular ($R_f = 1$) em relação a uma condição mais realista, em que $R_f \neq 1$ e $n = 0,2$ e $m = 1,6$. Nesta mesma condição de $R_f \neq 1$ a Fig.5.11 apresentou duas inclinações distintas, estas se devem a valores distintos das características do fundo(n,m). Para elaboração da Fig.5.11 foi utilizado os dois traçados de raios da Fig.5.10, neste caso procurou-se trabalhar com espaçamento entre pontos com valor unitário, sendo reduzido o alcance máximo como pode-se observar.

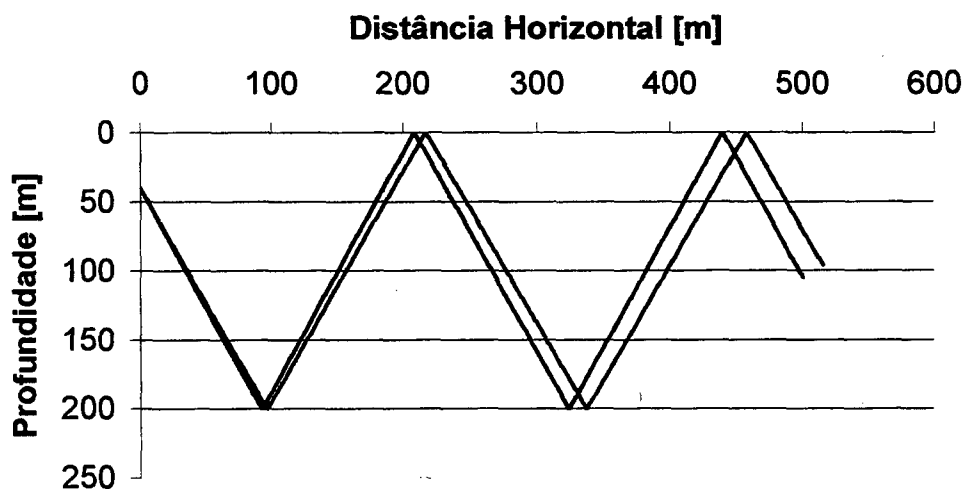


Figura 5.10 Traçado de raios com ângulos de ataque 30° e 31°, fonte a 40 m e receptor a 100m, perfil de velocidade da Fig.5.1, condições de reflexão não especular($R_f = 0,5$), 1000 pontos gerados e fundo plano com profundidade 200m.

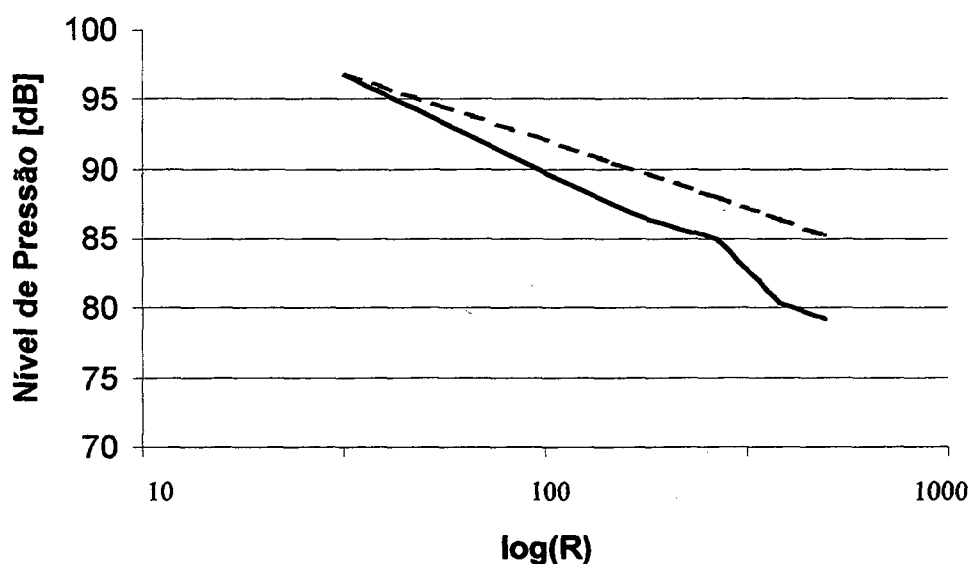


Figura 5.11 Comportamento do campo acústico da Fig. 5.10, linha tracejada para $R_f=1$ linha contínua para $n=0,2$ e $m=1,6$, fonte a 40 m e receptor a 100m, perfil de velocidade da Fig.5.1, 1000 pontos gerados e fundo plano com profundidade 200m.

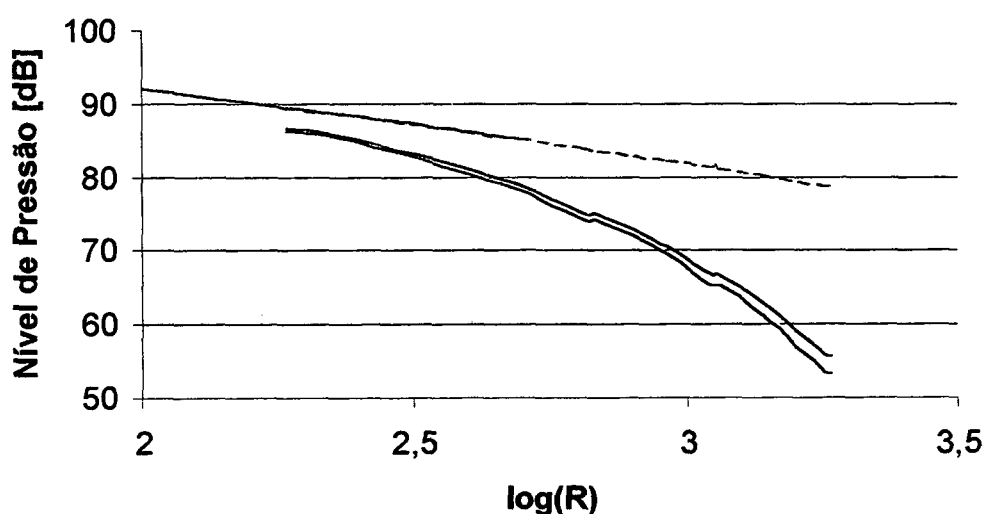


Figura 5.12 Comportamento do campo acústico para $R_f=1$ (linha tracejada), $n=0,01 / m=,6$, $n=0,1 / m=1,6$, $n=0,2 / m=1,6$ (linhas contínuas vermelha, amarela, verde respectivamente), fonte a 40 m e receptor a 100 m, perfil de velocidade da Fig.5.1, 1000 pontos gerados e fundo plano com profundidade 200m. R em metros.

Na Figura 5.12 trabalhou-se com valores distintos para n e m . Observa-se nesta, a diferença da curva tracejada em relação as curvas contínuas, que se deve as condições não idealizadas de reflexão e a interação dos raios com o fundo

Conforme apresentado por Frisk [17], as perdas de transmissão provocadas pela incidência da onda sonora com o fundo oceânico não é função apenas dos índices de refração n e m , é função também do ângulo de incidência da onda sonora com o fundo oceânico. Nas Fig. 5.13, Fig.5.14, Fig.5.15 e Fig.5.16 pode-se analisar o comportamento do coeficiente de reflexão em função de n , m e do ângulo de incidência, implementado no P.A.S.

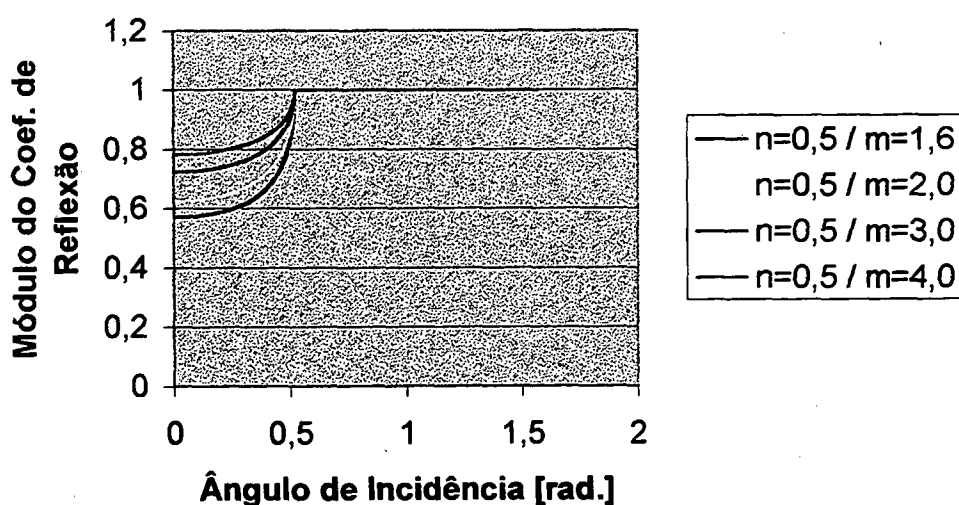


Figura 5.13 Curvas do módulo do coeficiente de reflexão com $n=0,5$ e m variável.

As Fig.5.13 e Fig. 5.14 são típicas de reflexão água-fundo. Nas Fig.5.13 e Fig.5.14 os valores dos ângulos nos pontos onde o módulo do coeficiente de reflexão passa a ter valores unitários, chama-se ângulo crítico, a partir deste ponto considera-se reflexão total.

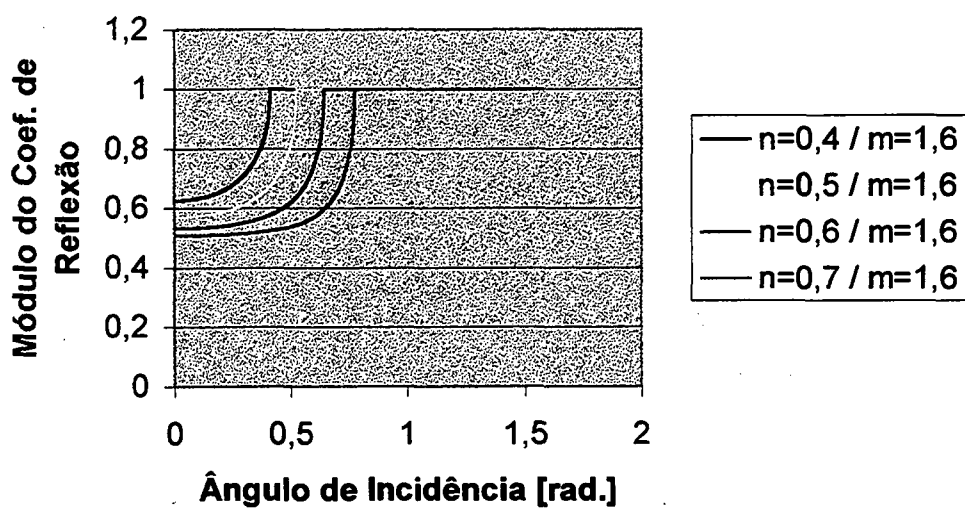


Figura 5.14 Curvas do módulo do coeficiente de reflexão com n variável e $m=1.6$.

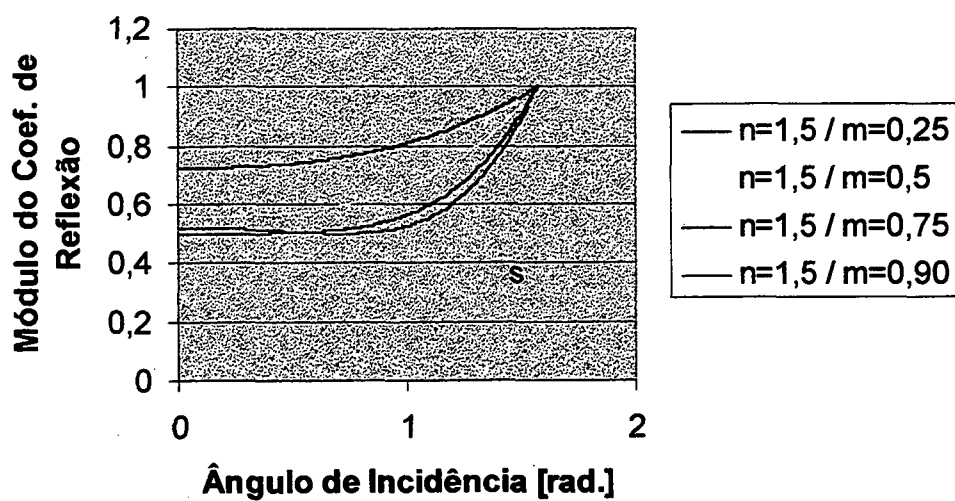


Figura 5.15 Comportamento do coeficiente de reflexão para $n=1.5$ e $m<1$.

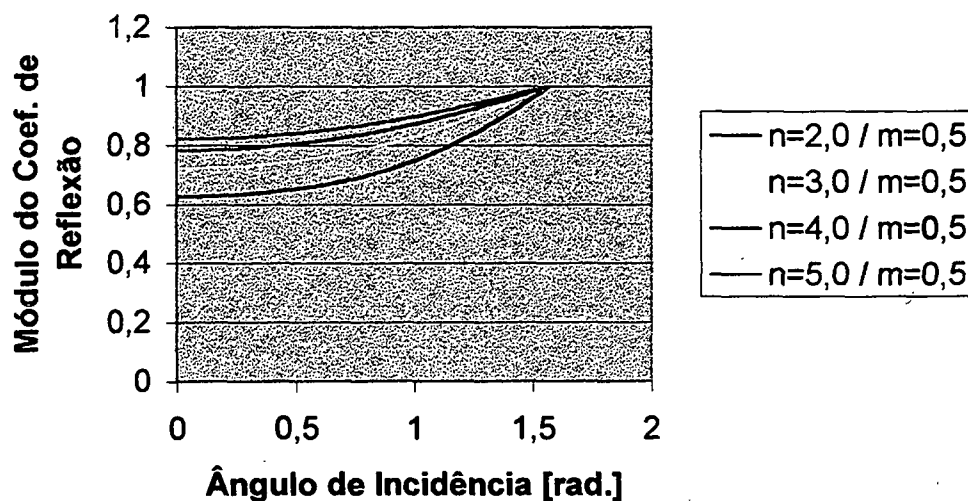


Figura 5.16 Comportamento do coeficiente de reflexão para $n > 1$ e $m = 0,5$.

As Fig.5.15 e Fig.5.16 são típicas de reflexão água-superfície. O valor do módulo do coeficiente de reflexão tende ao valor unitário quando o valor do ângulo de incidência tende a 90° .

5.3- POSIÇÃO DA FONTE

Os casos analisados, em que a variável fora a posição da fonte, foram utilizados a fim de se observar a influência desta no comportamento acústico. A Fig.5.17 aglutinou seis curvas, resultantes de distintas posições da fonte, em um mesmo meio físico e considerando as condições ideais de reflexão. Observa-se que com a variação apenas da posição da fonte, nas condições especificadas, não ocorreu alterações significativas no comportamento do campo acústico, sendo que a maior diferença entre os valores foi em torno de 0,5 dB.

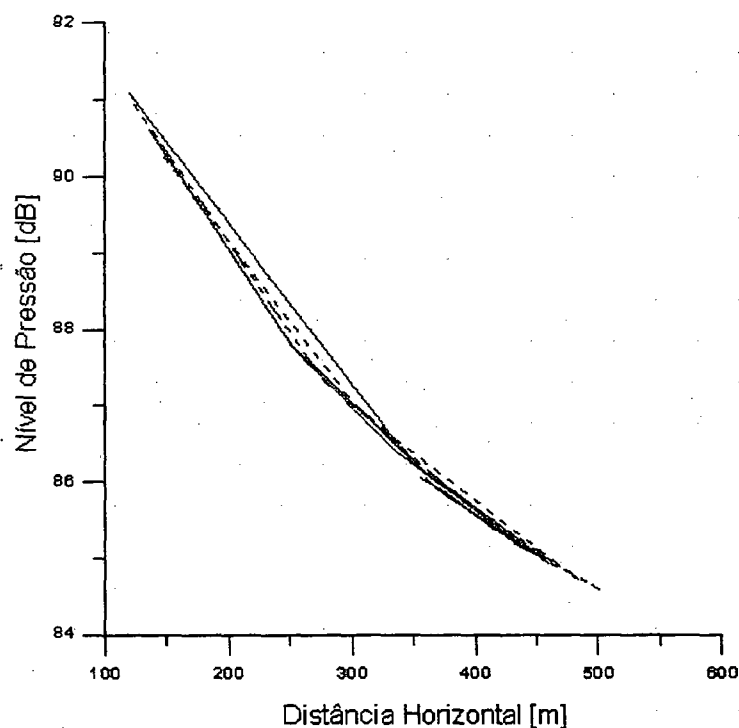


Figura 5.17 Comportamento do campo acústico em condições idealizadas de reflexão ($R_f = 1$), fonte a 20, 40, 60, 100, 175, 190m; array a 40m, perfil de velocidade variável; fundo inclinado a $2,86^\circ$, sentido de propagação da parte mais funda para mais rasa “upward” e ângulo de ataque $30-31^\circ$.

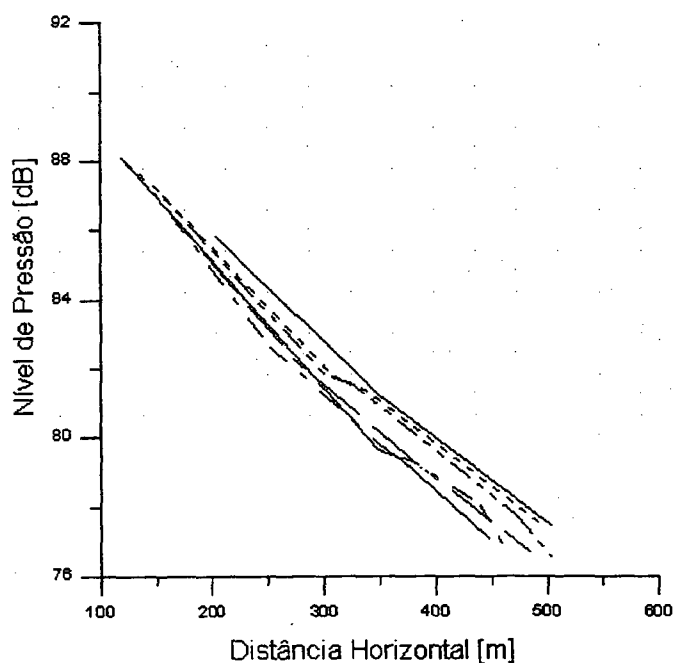


Figura 5.18 Comportamento acústico com $R_f \neq 1$ ($n=0,2$ e $m=1,6$), fonte a 20m,

40m, 60m, 100m, 175m, 190m; array a 40m, perfil de velocidade variável, fundo inclinado a $2,86^\circ$, sentido de propagação da parte mais funda para mais rasa “upward” e ângulo de ataque $30-31^\circ$.

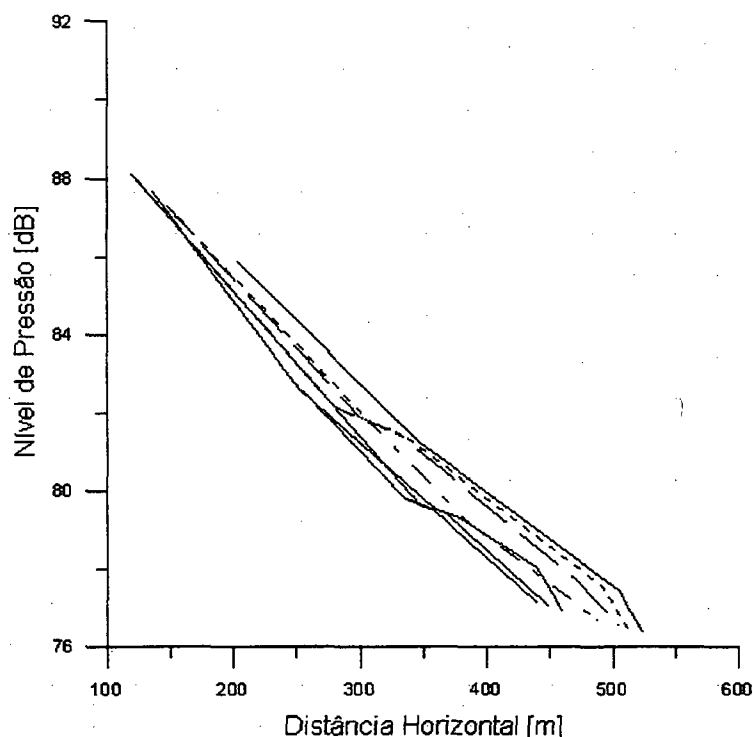


Figura 5.19 Comportamento acústico com $R_f \neq 1$ ($n=0,2$ e $m=1,6$), fonte a 20, 40m, 60m, 100m, 175m, 190m; array a 40m, perfil de velocidade constante (1500 m/s), fundo inclinado a $2,86^\circ$, sentido de propagação da parte mais funda para mais rasa “upward” e ângulo de ataque $30-31^\circ$.

Nas Fig.5.18 e Fig.5.19, a diferença entre os níveis de pressão, em pontos com mesma cota horizontal, apresentou valores em torno de 2 dB. Esta maior diferença se deve as condições não simplificadas de R_f , que contribui para com uma maior perda do nível sonoro.

Na Fig. 5.19 manteve-se a mesma tendência observada na Fig.5.18, a qual se teve uma particularidade de trabalhar com uma variação máxima da velocidade sonora de 02 m/s entre as cotas 0 e 200 m. Por utilizar este modelo de perfil de velocidades, não permitiu-se grande influência deste na propagação sonora, predominando os efeitos das condições de reflexão, como observado na Fig. 5.18.

Considerando as condições de propagação como reais, a posição da fonte, segundo os dados apresentados pelo P.A.S. passam a ser influenciáveis no comportamento do campo acústico.

5.4- POSIÇÃO DO RECEPTOR

Os casos analisados considerando como variável a posição do receptor seguiu os mesmos passos com relação à posição da fonte. A Fig. 5.20 concentrou seis curvas, em distintas posições do receptor, em um mesmo meio físico e considerando as condições reais de reflexão ($n=0,2$ e $m=1,6$). Observa-se que com a variação apenas da posição da receptor, nas condições especificadas, ocorreram alterações na ordem de até 2 dB, no comportamento do campo acústico entre as curvas.

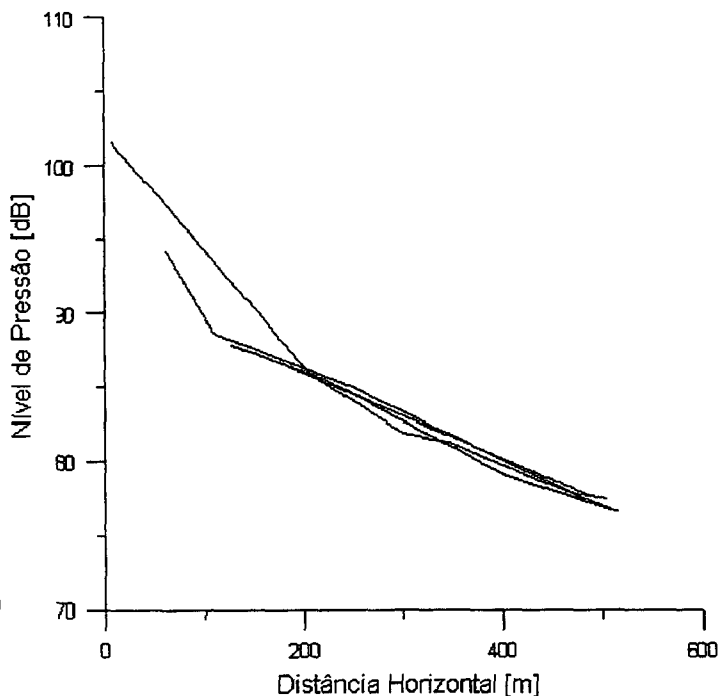


Figura 5.20 Comportamento do campo acústico em condições de reflexão não idealizadas ($n=0,2$ e $m=1,6$), receptor a 20m, 60m, 100m, 150m, 175m, 190m; fonte a 40m, perfil de velocidade variável, fundo inclinado a $2,86^\circ$, sentido de propagação da parte mais funda para mais rasa "upward" e ângulo de ataque $30-31^\circ$.

A Fig. 5.21 obedece as mesmas condições da Fig. 5.20 exceto o tipo de fundo, que neste caso é do tipo plano. Com os receptores posicionados até a cota de 100 m, houve uma pequena variação, menor do que 0,5 dB, porém com os receptores nas cotas de 150m, 175m e 190m, esta variação nas curvas dilatou para 02 dB. Este fato ocorre devido à proximidade destas cotas com a região de descontinuidade dos raios acústicos devido ao processo de reflexão da onda acústica.

Similar à Fig. 5.20, a Fig. 5.21 também comprova a importância da cota da linha receptora na determinação do campo acústico.

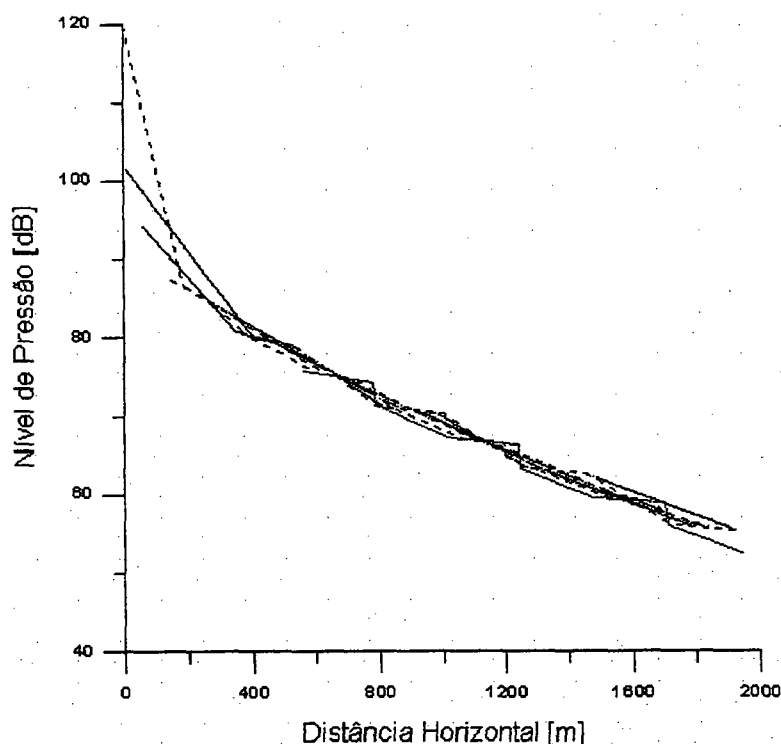


Figura 5.21 Comportamento do campo acústico em condições de reflexão não idealizadas ($n=0,2$ e $m=1,6$), receptor a 20m, 40m, 60m, 100m, 150m, 175m e 190m; fonte a 40m, perfil de velocidade variável, fundo plano a 200m, sentido de propagação da parte mais funda para mais rasa "upward" e ângulo de ataque 30-31°.

Conforme apresentado na posição da fonte, a posição do receptor, segundo os dados apresentados pelo P.A.S. é influenciável no comportamento do campo acústico.

5.5- SOLO OCEÂNICO

A forma do solo oceânico é uma das características influentes na propagação sonora em águas rasas. Como pode-se observar nas Fig. 5.22 e Fig. 5.23. Na primeira, fundo inclinado e propagação upward, o alcance horizontal para condição de fundo plano é significativamente maior em relação a outras topografias, este fato se deve à menor incidência dos raios acústicos com a superfície e o fundo oceânico. Relacionando somente os fundos inclinados, observa-se que a interação dos raios acústicos com os contornos é intensa, e altera significativamente a curva de pressão ao longo da distância. Não apenas sua forma geométrica, mas principalmente suas características físicas, são fatores influentes na perda de transmissão, como observado no estudo das condições de reflexão.

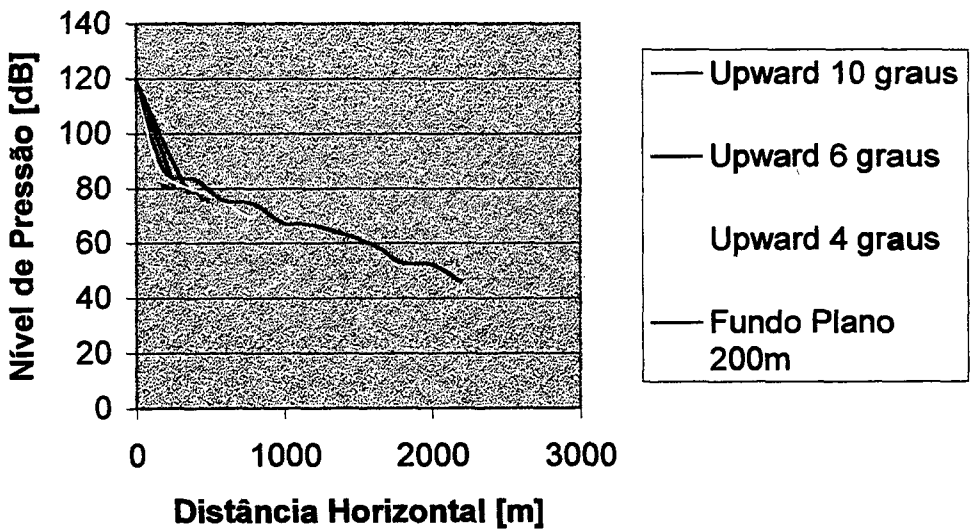


Figura 5.22 Comportamento do nível de pressão com fundo inclinado, perfil de velocidade conforme Fig.5.1, $n=0,2$, $m=1,6$, 1000 pontos, fonte e array a 100m, ângulos de ataque 45° e 46° .

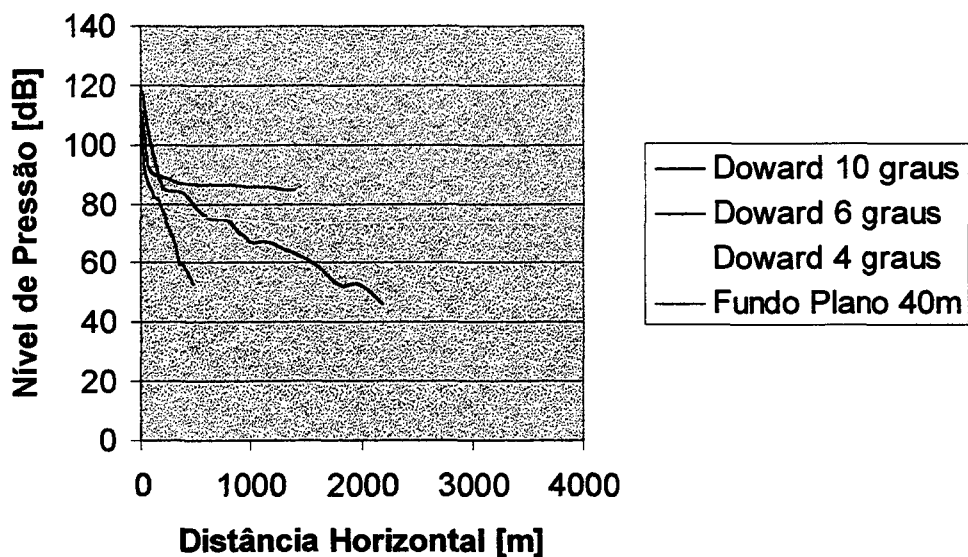


Figura 5.23 Comportamento do nível de pressão com fundo inclinado, perfil de velocidade conforme Fig.5.1, $n=0,2$, $m=1,6$, 1000 pontos, fonte e array a 20m, ângulos de ataque 45° e 46° .

Na propagação descendente, Fig 5.23, acontece o inverso com relação ao alcance para condição para fundo plano. Por ser um fundo com 40m de profundidade, a interação das ondas acústicas com o fundo é mais intensa do que as demais condições ora apresentadas. Entre as demais condições de propagação descendente, observa-se que a influência do tipo de fundo é significativa no estudo de propagação em águas rasas.

Na Fig.5.24 é verificado o comportamento do P.A.S. para fundo com geometria não contínua. Observa-se que o traçado de raios percorre até o limite imposto pela curva que determina o fundo oceânico. Na Fig.5.25 é apresentado o comportamento do campo acústico nas condições da Fig.5.24. Foram rodados outras formas de fundo e os resultados apresentados foram similares ao apresentado pela Fig.5.24.

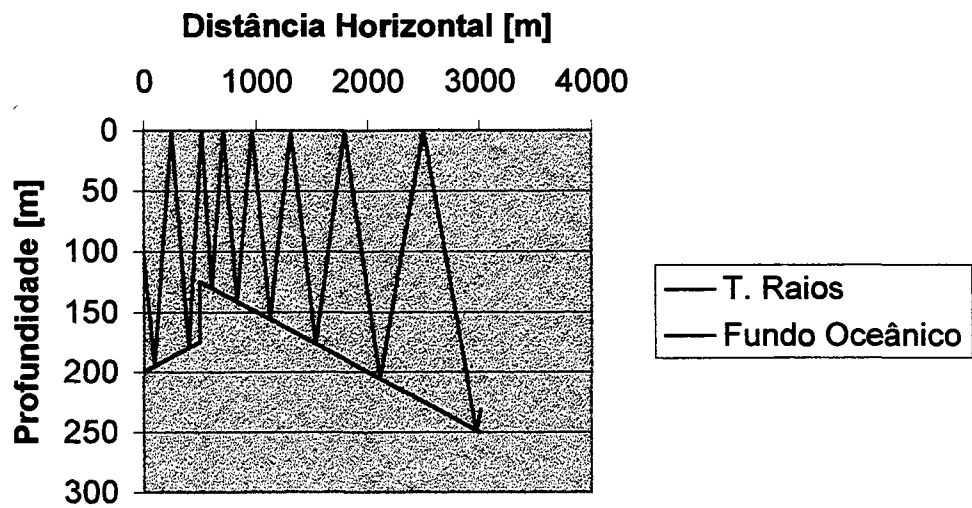


Figura 5.24 Comportamento do traçado de raios nas condições de perfil de velocidade conforme Fig.5.1, $n=0,2$, $m=1,6$, 1000 pontos, fonte e array a 100m, ângulo de ataque 45° .

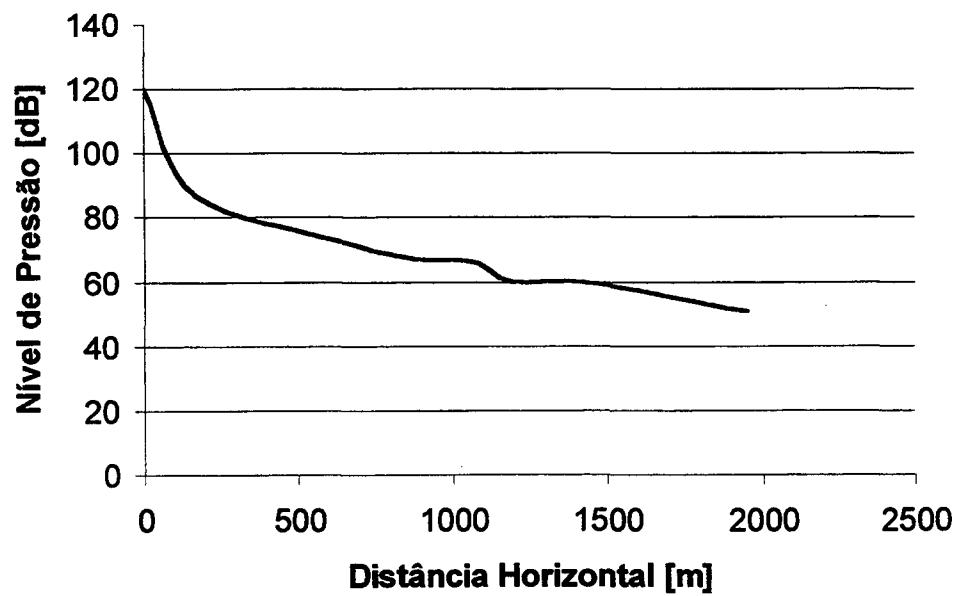


Figura 5.25 Comportamento do nível de pressão com fundo conforme Fig.5.23, perfil de velocidade conforme Fig.5.1, $n=0,2$, $m=1,6$, 1000 pontos, fonte e array a 100m, ângulos de ataque 45° e 46° .

5.6- INTERVALO ANGULAR E VARIAÇÃO ANGULAR

A utilização de um pequeno intervalo angular representativo do campo acústico visa redução do tempo de processamento e, como consequência, melhora da eficiência operacional do programa implementado. A grande preocupação está no fato de ser, ou não, representativa. Para tanto foram rodados casos em diversas faixas angulares e variações angulares, nos diversos tipos de fundos e perfis de velocidade sonora.

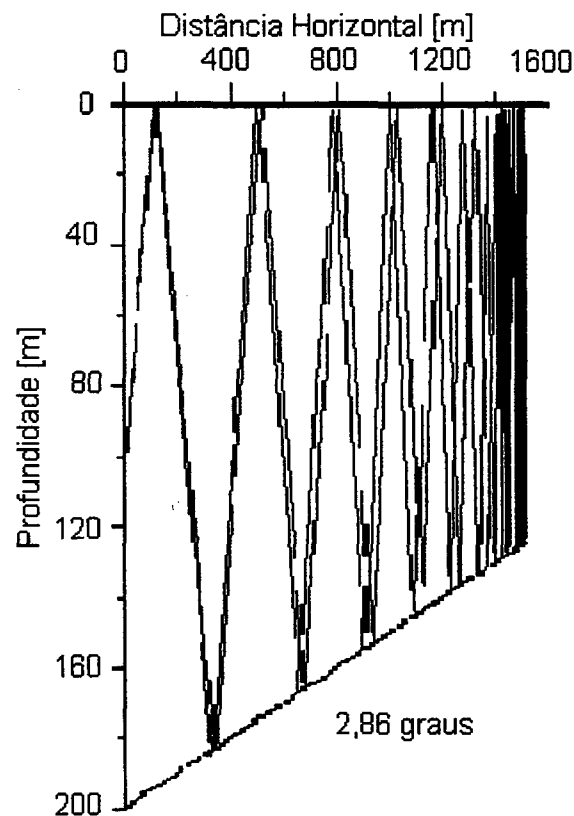


Figura 5.26 Traçado de raios com ângulos de ataque de 130° e 131° em condições ideais de reflexão ($R=1$), fonte a 100 m, receptor na cota de 30 m de profundidade.

As Fig.5.26, Fig.5.27 e 5.28 apresentam os traçados de raios com seus respectivos comportamentos do campo acústico. Observou-se que para pequenas variações do ângulo de ataque, variação unitária, a diferença entre os campos acústicos apresenta valores pequenos, porém à medida que se estende a diferença entre os valores do feixe angular, os campos acústicos passam a se diferenciar, conforme Fig.5.28A.

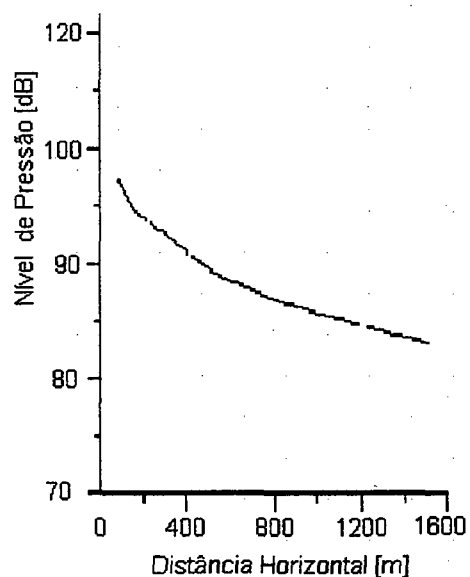


Fig.5.27 Campo acústico obtido pelo traçado de raios da Fig.5.26

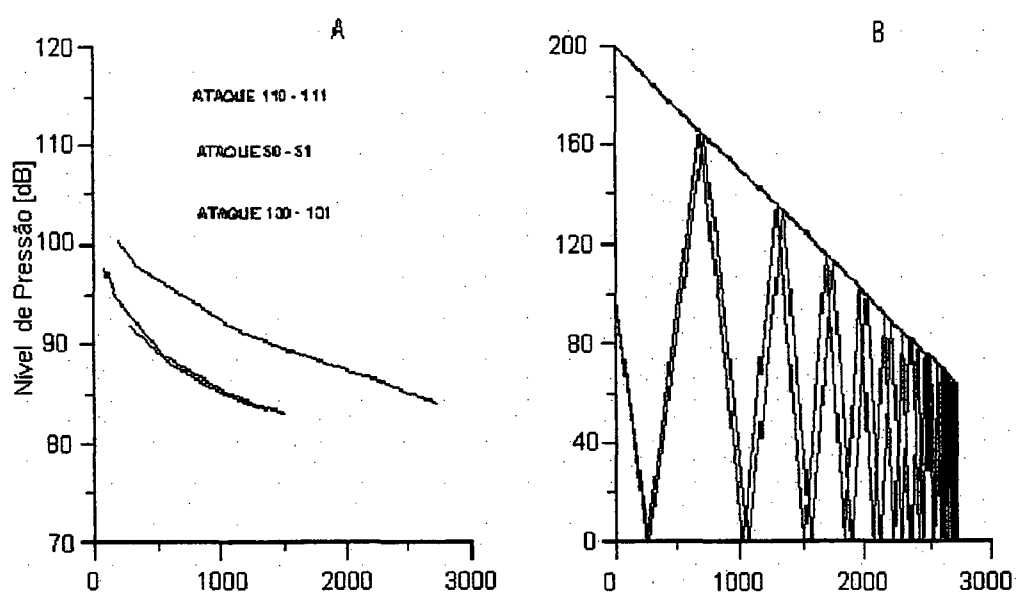


Figura 5.28 (A) Curvas de níveis de pressão com diferentes ângulos de ataque.(B) Traçado de raios, em fundo inclinado, com ângulos de ataque 110° e 111° . Em condições ideais de reflexão ($R=1$), fonte a 100m, receptor na cota de 30 m de profundidade.

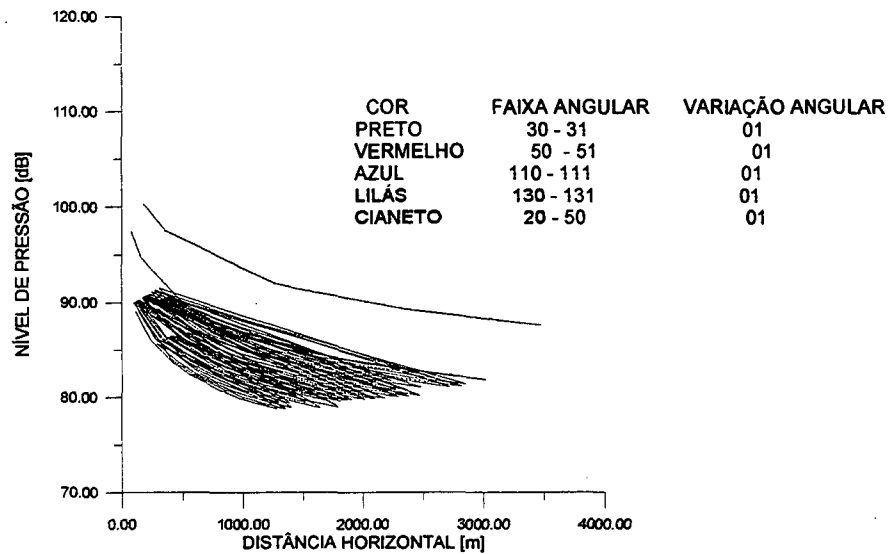


Figura 5.29 Curvas de níveis de pressão com diferentes ângulos de ataque e faixa angular, em fundo do tipo plano. Em condições ideais de reflexão ($R=1$), fonte a 100 m, receptor na cota de 30 m de profundidade.

As curvas de cor preta e vermelha não podem ser visualizadas na Fig. 5.29 por estarem sob a curva de cor cianeto, correspondente aos níveis de pressão de uma faixa angular de 20° a 50° .

5.7 INFLUÊNCIA DO PERFIL DE VELOCIDADES

Nas Fig. 5.30 (A) tem-se na parte inferior o traçado de raios com fonte a 30m, ângulo de ataque de 90° , correspondente ao perfil de velocidade na Fig.5.30 (B), velocidade linearmente crescente com 1.500m/s na superfície e 1.517m/s na cota de 30m. Observa-se neste caso que a profundidade máxima alcançada pelo raio não ultrapassa a profundidade de 30m e o alcance máximo horizontal (4.000m) é percorrido.

Observando a parte central da Fig.5.30(A) cuja fonte está a 100m, ângulo de ataque de 30° , corresponde ao perfil de velocidade constante até 120m de profundidade e linearmente decrescente após esta cota. Este traçado

de raios apresenta grande incidência com o fundo e alcance horizontal até 2000m.

No terceiro caso da Fig.5.30(A), na parte superior, com fonte a 130m, ângulo de ataque de 90° , correspondente ao perfil de velocidade linearmente decrescente, 1.537m/s a 120m e 1.500m/s a 200m de profundidade. Observa-se neste caso uma menor incidência dos raios com o fundo, um alcance horizontal maior que os demais casos e limite de profundidade entre as cotas de 130m a 200m, devido ao comportamento do perfil de velocidade.

Na Fig.5.31(A) tem-se o traçado de raios para o mesmo perfil de velocidades na Fig.5.31(B), diferindo apenas a posição da fonte. Observa-se que com a fonte na cota de 100m, no centro da cunha do perfil de velocidade, o raio acústico sofre menos alterações o seu percurso, percorrendo distâncias horizontais maiores, porém varrendo uma pequena região em torno da cota de 100m.

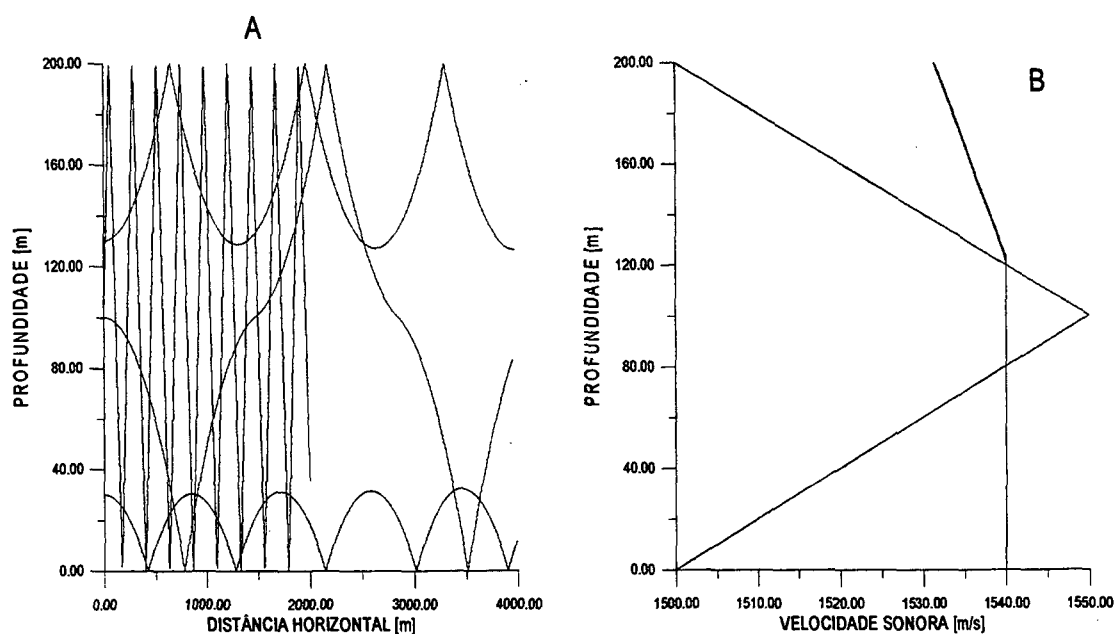


Figura 5.30 (A) Traçado de raios com distintos perfis de velocidade e posições da fonte. Ângulos de ataque de mesmo valor (90°).
(B) Perfis de velocidade dos correspondentes traçados de raios.

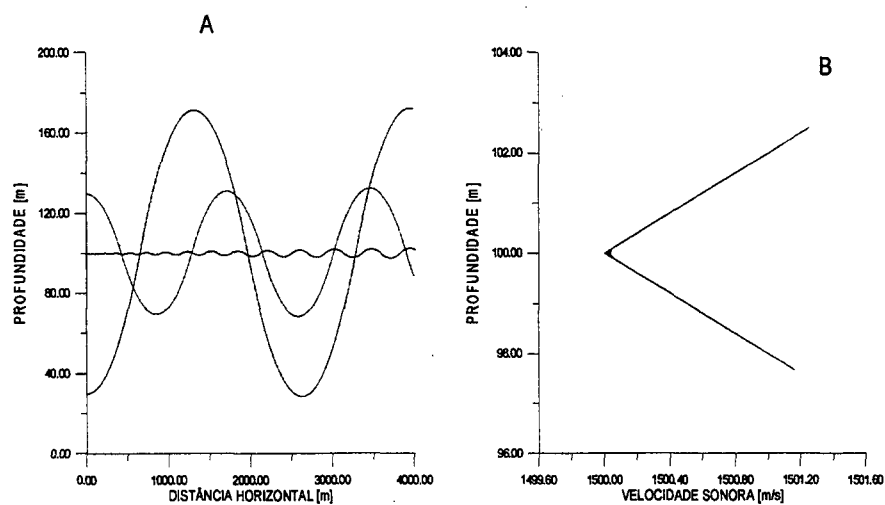


Figura 5.31 (A) Influência do perfil de velocidades conjugado com a posição da fonte. Ângulos de ataque 90° e fundo plano.
(B) Perfil de velocidades utilizado.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O programa de cálculo do campo de pressão em lâminas de águas rasas por acústica de raios representa um início de atividades voltadas para a grande área de Acústica Submarina, que tem sido pouquíssimo estudada até o momento neste país. Este trabalho tem como objetivo final desenvolver um programa completo capaz de produzir a Perda de Transmissão do som em águas rasas, considerando um modelo físico suficientemente preciso, incluindo o deslocamento dos raios na interface com a camada de sedimento para ângulos de incidência maiores que o crítico, e a formação de cáustica. Este trabalho aborda as atividades relacionadas ao início deste projeto, através do qual podem ser citadas várias conclusões.

A comparação entre os resultados do programa de Acústica de Raios com os obtidos analiticamente, tanto par fundo plano, bem como para fundo inclinado, indicou uma boa precisão, servindo para validar os resultados a serem obtidos para outras configurações de geometria de fundo e outros parâmetros.

A quantidade de pontos utilizada para a discretização do campo é de fundamental importância para a precisão do cálculo da pressão sonora, que está associada também ao tempo de processamento e ao alcance máximo (máxima distância contida a partir da fonte).

A perda de transmissão não varia de forma significativa com a profundidade da fonte a menos que esta esteja muito próxima do fundo. O ângulo de ataque, entretanto, proporciona resultados sensivelmente diferentes, possivelmente devido à variação do número de incidências dos raios no fundo, onde a maior parte da energia sonora é dissipada.

O perfil de velocidades é facilmente representado através da estratificação do meio, conseguindo representar com bastante precisão perfis reais de velocidade.

Lâminas de água com fundos tendo geometria levemente irregular podem ser analisadas por Acústica de Raios. Alguns exemplos contendo

irregularidades acentuadas no fundo, tais como um degrau e simulação de um piso, indicaram dificuldades e grande sensibilidade dos resultados de perda de transmissão a pequenas variações nestas irregularidades.

Como sugestões para trabalho futuro na forma de continuidade a este, recomenda-se a introdução de modelos mais representativos do modelo físico, incluindo geometria irregular da interface água-ar, a consideração de uma espessura fina para a camada de sedimento, a consideração do deslocamento do feixe (dos raios) na camada de sedimento para ângulo de incidência supercríticos, um modelo para a formação de cáusticas e estender este modelo para propagação em três dimensões.

7 BIBLIOGRAFIA

- 1 Kibblewhite, Alick C.: **Attenuation of sound in marine sediments: A review with emphasis on new low-frequency data.** J. Acoust. Soc. Am. 86(2), 716-738 (1989).

- 2 Clay, C. S., and Medwin, H.: **Acoustical Oceanography: Principles and Applications.** John Wiley & Sons, New York, 1977.

- 3 Burdic, William S.: **Underwater acoustic system analysis.** Prentice hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.

- 4 Urick, Robert J. : **Principles of underwater sound.** McGraw - Hill Book Company, New York, 1983.

- 5 Mellen, R. H.: **Thermal noise limit in the detection of underwater acoustic signal,** J. Acoust. Soc. Am., 24:478 (1952).

- 6 Soares, William F. : **Measurements and modeling of multitone, low frequency acoustic data from the Arraial do Cabo Range,** Naval Research Laboratory, 1993.

- 7 Mackenzie, K. V. : **Discussion of sea water sound speed determinations,** J. Acoust. Soc. Am. 70(3), 1981.

- 8 Kuwahara, S. : **Velocity of sound in sea water and calculation of the velocity for use in sonic sounding,** Jpn. J. Astron. Geophys 16(1) 1938.

- 9 Mackenzie, K. V. : **Formulas for the computation of sound speed in sea water,** J. Acoust. Soc. Am. 32, 1960.

- 10 Mackenzie, K. V. : **Equation for sound speed in the oceans**, J. Acoust. Soc. Am. 70, 1981.
- 12 **Physics of Sound in the Sea**, National Defense Research Committee (NDRC) 80, 1969.
- 13 Jensen, F.B. e Ferla, C.M. : **Numerical Solutions of range dependent benchmark problems in ocean acoustics**, J. Acoust. Soc. Am. 87, 1990.
- 14 Buckingham, Michael J. : **An analytical solutions for benchmark problem 1: The ideal wedge**, J. Acoust. Soc. Am. 87(4), Abril 1990.
- 15 Westwood, Evan K. : **Ray model solutions to the benchmark wedge problems**, J. Acoust. Soc. Am. 87(4), Abril 1990.
- 16 Lieberman, L.N. : **Origin of sound absorption in water and sea water**, J. Acoust. Soc. Am. 20, 1948.
- 17 Frisk, George V. : **Ocean and seabed acoustics: a theory of wave propagation**, Prentice Hall, Inc, New Jersey, 1994.
- 18 Brekhovskikh, L.M. e Lysanov, Yu.P. : **Fundamentals of ocean acoustics**, Springer-Verlag, Germany, 1991.
- 19 Etter, Paul C. : **Underwater acoustics modeling principles, techniques and applications**, Elsevier Science Publishers Ltda, USA, 1991.
- 20 Knudsen, V.O., Alford, R.S. e Emling, J. W. : **Underwater ambient noise**, Journal Mar. Res. 7:410(1948).
- 21 Churchill, Ruel V. : **Variáveis complexas e suas aplicações**, Mc-Graw-Hill do Brasil e Editora da Universidade de São Paulo, 1975.

22 Spiegel, Murray R. : **Manual de fórmulas, métodos e tabelas de matemática**, Schaum Mc-Graw-Hill, São Paulo, 1992.

23 Bell, T. G.: **Sonar and Submarine Detection**. U. S. Navy Underwater Sound Lab. Rep. 545, 1962.